

Zur hydraulischen Bemessung von Kornfiltern maritimer Bauwerke bei schichtorthogonaler, oszillierender Durchströmung

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
David Schürenkamp
geboren am 24.04.1983
aus Rheda-Wiedenbrück

Eingereicht am: 06. April 2017

Disputation am: 18. Juli 2017

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. H. Oumeraci
Prof. Dr.-Ing. J. Grabe

2017

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) der Technischen Universität Braunschweig. Ich danke der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für das Vertrauen und die finanzielle Unterstützung zur Durchführung des Forschungsvorhabens.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Hocine Oumeraci für die Anregung zur Promotion sowie für die Unterstützung und die intensive Begutachtung meiner Arbeit. Für die vielen hilfreichen Gespräche, die investierte Zeit, das entgegengebrachte Vertrauen und die damit verbundenen Freiheiten in meiner Forschungsarbeit möchte ich mich besonders bedanken.

Bei allen Kolleginnen, Kollegen und Studierenden, die mich in diesem Projekt begleitet haben, möchte ich mich für die fachliche und moralische Unterstützung in familiärer Arbeitsatmosphäre bedanken. Mein Dank gilt zudem Herrn Dr.-Ing. Hisham Elsafti für die Bereitstellung des numerischen Modells und für die zahlreichen fachlichen Diskussionen.

Herrn Dr.-Ing. Jan Kayser und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe möchte ich für die freundliche Unterstützung zur Nutzung der Wechseldurchströmungsanlage und für eine besonders positive Atmosphäre in der Arbeitsgruppe danken. Ich danke Herrn Fabian Karl für die sehr angenehme und konstruktive Zusammenarbeit beim Aufbau der Versuchsanlage, die mich mit viel Freude auf die Zeit in Karlsruhe zurückblicken lässt.

Mein ganz besonderer und herzlicher Dank gilt meiner Frau Julia. Ich danke dir für deine nahezu endlose Geduld und für Ermutigung, Motivation und Kraft, die du mir gibst. Für die Unterstützung, den Zusammenhalt und Ansporn danke ich meiner Familie und meinen Freunden von Herzen.

Abstract

Bed protections for offshore, coastal and harbour structures are subject to the impact of wave-induced currents and are supposed to resist erosion processes. The safety of filters in these marine structures will face new challenges by the expected sea level rise due to climate changes. In this context, granular filters consisting of round or crushed rock materials are used to (i) preserve bed and bank protections against erosion of the seabed material, (ii) increase the effective stresses by additional load, and (iii) prevent sinking of cover layer elements into the seabed. The hydraulic stability of grain filters is dependent on the hydraulic load of wave-induced currents as well as the resistance of the filter material to erosion processes (e.g. contact erosion and internal erosion). The aim of this study is, therefore, the assessment of the interaction between geotechnical and hydraulic processes for the hydraulic design of granular filters in marine structures.

The current scientific knowledge on the stability of granular filters under wave-induced currents is analysed, in order to identify the most relevant knowledge gaps. Based on this, a new experimental setup for the oscillatory flow system (WDA) is developed and optimized for systematic laboratory tests. By analyzing the laboratory data, the stability of granular filters is classified in the context of the critical hydraulic gradient under unidirectional and oscillatory flow. One of the most important obtained results is the significantly lower resistance of grain filters under oscillating flow compared to unidirectional flow. Furthermore, the interaction between the erosion processes and the hydraulic behavior of the filter setup is observed and established for the dynamic stability of grain filters. In addition, the further analysis of the laboratory experiments provides the resistance coefficient of the Forchheimer equation as an important contribution to the modeling of oscillating flows in wide-graded filter materials.

The numerical model *geotechFoam* developed by El Safti (2015) is optimised, validated and applied for the extension of the laboratory data. The numerical simulations are used for a systematic parameter study to investigate further effects on the hydraulic processes in the filter structure. The hydraulic effect can be described as a function of the wave conditions (e.g. wave height, wave period and water depth) for the determination of the decisive hydraulic gradients at the layer boundary between the base material (sand) and the filter material (sand/gravel mixture). The hydraulic design criteria for granular filters are based on the relevant hydraulic gradient and the critical gradient as a function of the filter properties (grain distribution, bulk density and soil stress). New design formulae are developed for the determination of the required geometric filter characteristics taking into account the wave conditions.

Kurzfassung

Deckwerksaufbauten von Sohlsicherungen in Offshore-, Küsten- und Hafenbauwerken unterliegen der Einwirkung aus welleninduzierten Strömungen und wirken Erosionsprozessen entgegen. Der zu erwartende Anstieg der Seegangseinwirkungen infolge von Klimaänderungen stellt die Sicherheit dieser Bauwerke und insbesondere deren Filteraufbauten vor neue Herausforderungen. In diesem Zusammenhang werden Kornfilter, bestehend aus rundkörnigem oder gebrochenem Gesteinsmaterial, eingesetzt, um (i) Sohl- und Böschungssicherungen vor dem Ausspülen des Gründungsmaterials zu schützen, (ii) die effektiven Spannungen durch zusätzliche Auflast zu erhöhen und (iii) somit das Einsinken von Deckwerkselementen zu verhindern. Die hydraulische Stabilität von Kornfiltern ist abhängig von der hydraulischen Einwirkung aus welleninduzierten Strömungen sowie vom Widerstand des Filtermaterials gegenüber Erosionsprozessen (Kontakterosion und innere Erosion). Es ist daher die Zielsetzung dieser Studie, die Grundlagen zur Interaktion zwischen geotechnischen und hydraulischen Prozessen für die hydraulische Bemessung von Kornfiltern mariner Bauwerke zu schaffen.

Durch eine systematische Analyse des Wissensstands zur Stabilität von Kornfiltern unter welleninduzierten Strömungen wurden die maßgebenden Prozesse und die wichtigsten Wissenslücken identifiziert. Darauf aufbauend wird ein Versuchsaufbau in einer neuen Wechseldurchströmungsanlage entwickelt und optimiert, um systematische Laboruntersuchungen durchzuführen. Aufgrund der Analyse der experimentellen Daten wird die Stabilität von Kornfiltern in Abhängigkeit der maßgebenden hydraulischen Gradienten bei oszillierender und gleichgerichteter Strömung klassifiziert. Eines der wichtigsten Ergebnisse ist die deutlich geringere Stabilität von Kornfiltern unter oszillierender Strömung gegenüber gleichgerichteter Strömung. Weiterhin wird die Interaktion zwischen den Erosionsprozessen und dem hydraulischen Verhalten des Filteraufbaus als Grundlage für die dynamische Stabilität von Kornfiltern beobachtet und beschrieben. Darüber hinaus liefert die weitere Analyse der Laborexperimente zur Ermittlung der Widerstandskoeffizienten der Forchheimer-Gleichung einen substantiellen Beitrag zur Modellierung von oszillierender Strömung in eng- und weitgestuften Filtermaterialien.

Zur Erweiterung der Datengrundlage aus den Laborexperimenten wird das numerische Modell *geotechFoam* nach El Safti (2015) für die Fragestellung dieser Studie optimiert, validiert und angewendet. Hiermit werden in einer systematischen Parameterstudie weitere Einflussfaktoren der hydraulischen Prozesse im Filteraufbau untersucht. Dabei wird die hydraulische Einwirkung in Abhängigkeit der Wellenbedingungen (Wellenhöhe, Wellenlänge, Wellenperiode und Wassertiefe) zur Ermittlung des maßgebenden hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze zwischen Basismaterial (Sand) und Filtermaterial (Sand-Kies) beschrieben, wodurch die hydraulische Bemessung von Kornfiltern auf der Grundlage des maßgebenden hydraulischen Gradienten und des kritischen Gradienten in Abhängigkeit der Filtereigenschaften (Kornverteilung, Bodenspannung) ermöglicht wird. Zur Bemessung der erforderlichen geometrischen Filtereigenschaften werden Berechnungsformeln unter Berücksichtigung der Wellenbedingungen entwickelt.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	ix
Symbolverzeichnis	xi
1 Einführung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Methodik	3
2 Wissensstand und theoretische Grundlagen	5
2.1 Erosionsprozesse und Filterstabilität	6
2.1.1 Filteraufbau und -funktion	6
2.1.2 Erosions- und Umlagerungsprozesse	7
2.1.3 Stabilitätskonzepte und Filterkriterien	10
2.1.4 Geometrische Filterstabilität und geometrische Filterkriterien	10
2.1.5 Hydraulische Filterstabilität und hydraulische Filterkriterien	14
2.2 Welleninduzierte Strömungen in porösen Medien	20
2.2.1 Welleninduzierte Strömungs- und Druckverteilung	20
2.2.2 Welleninduzierter Porenwasserdruck, Konsolidierung und Verformung	24
2.2.3 Lineare und nichtlineare Ansätze zu Strömungen in porösen Medien	30
2.2.4 Phasenübergänge in porösen Medien	38
2.3 Numerische Modellierung hydrodynamischer und bodendynamischer Prozesse	40
2.3.1 Modellierung der Strömung mit freier Wasseroberfläche	40
2.3.2 Bodendynamische und geohydraulische Modellierung	41
2.4 Präzisierung der Zielsetzung und Methodik	45
2.4.1 Wissenstand, offene Fragen und Einschränkungen	45
2.4.2 Zielsetzung	46
2.4.3 Methodik und Arbeitsprogramm	47
3 Laboruntersuchungen mit der Wechseldurchströmungsanlage	51
3.1 Modellaufbau und Messkonzept	52
3.1.1 Wechseldurchströmungsanlage	52
3.1.2 Versuchszelle und Messtechnik	52
3.1.3 Voruntersuchungen und Optimierung der Versuchsanlage	55
3.1.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung für die Versuchsdurchführung	57
3.2 Versuchsprogramm und -durchführung	58
3.2.1 Hydraulische Parameter	58
3.2.2 Parameter des Basis- und Filtermaterials	61
3.3 Datenaufbereitung	64
3.3.1 Äquivalente Wellenparameter	64
3.3.2 Porenwasserdruckverteilung und Filtergeschwindigkeit	67
3.3.3 Auflastregelung und Setzungsmessung	68
3.3.4 Korrelations- und Regressionsanalyse	68

3.3.5	Modelleffekte und Randeinflüsse	69
3.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für die Analyse der Versuchsergebnisse	71
4	Numerische Modellierung der (geo-) hydraulischen Prozesse	73
4.1	Anforderungen an die numerische Modellierung	74
4.2	Gleichungen des geohydraulischen Modells geotechFoam	76
4.2.1	Massenerhaltung	77
4.2.2	Impulserhaltung	77
4.2.3	Unstetigkeit an der Grenze zweier Bodenschichten unterschiedlicher Durchlässigkeit	78
4.3	Aufbau und Geometrie des numerischen Modells	80
4.3.1	Gittergenerierung und -optimierung	80
4.3.2	Rand- und Anfangsbedingungen	82
4.3.3	Ergebnisausgabe	83
4.4	Kalibrierung des numerischen Modells mit Labordaten	84
4.5	Validierung des geotechnischen Modells mit Labordaten	86
4.5.1	Hydraulische und geotechnische Randbedingungen	86
4.5.2	Vergleich mit gemessenen Zeitreihen des (welleninduzierten) Porenwasserdrucks	87
4.5.3	Vergleich mit den experimentellen hydraulischen Gradienten als Zeitreihe und als Funktion der Filtergeschwindigkeit	89
4.6	Sensitivitätsanalyse und Programm der numerischen Parameterstudie	93
4.6.1	Testprogramm für die numerische Sensitivitätsanalyse	93
4.6.2	Testprogramm der numerischen Parameterstudie	98
4.7	Anwendbarkeit und Einschränkungen	101
4.7.1	Eingangs- und Randbedingungen	101
4.7.2	Simulation von Strömungen in porösen Medien mit dem Modell geotechFoam	101
4.7.3	Gittergeometrie und -auflösung	101
4.8	Zusammenfassung und Bewertung der numerischen Untersuchungen	103
5	Laborergebnisse: Erosions- und bodenmechanische Prozesse	105
5.1	Kontakterosion und Infiltration	107
5.1.1	Bewertung der Erosionsprozesse durch Siebanalysen	108
5.1.2	Innere Erosion im Filter	112
5.1.3	Einfluss der Erosionsprozesse auf die geohydraulischen Bodeneigenschaften	113
5.2	Verformungsverhalten und Spannungsverteilung	116
5.2.1	Bewertung der Filterstabilität anhand des Verformungsverhaltens	117
5.2.2	Vergleich von unidirektionaler und oszillierender Strömung	119
5.2.3	Spannungsverteilung und vertikale Verformung	120
5.3	Klassifizierung der Filterstabilität	122
5.4	Zusammenfassung und Bewertung der Laborergebnisse zu geohydraulischen Prozessen	125
6	Labordaten und numerische Untersuchungen zu geohydraulischen Prozessen im Filteraufbau	127
6.1	Porenwasserdruckverteilung und hydraulische Gradienten	129
6.1.1	Vertikale Porenwasserdruckverteilung im Laborexperiment	129
6.1.2	Zeitreihe des hydraulischen Gradienten im Basis- und Filtermaterial	133

6.1.3	Transmission und Dissipation des dynamischen Drucks im Basis- und Filtermaterial	134
6.1.4	Hydraulischer Gradient an der Schichtgrenze Basis-/Filtermaterial	140
6.2	Welleninduzierte Porenwasserströmung im Filteraufbau.....	146
6.2.1	Vertikale Filtergeschwindigkeit	146
6.2.2	Forchheimer- und Widerstandskoeffizienten der Strömung im Basis- und Filtermaterial	151
6.3	Zusammenfassung und Bewertung der geohydraulischen Prozesse	159
6.3.1	Welleninduzierter maßgebender hydraulischer Gradient	159
6.3.2	Welleninduzierte Porenwasserströmung und Fließwiderstand im Filteraufbau ...	160
6.3.3	Modelleffekte, Anwendbarkeit und Einschränkungen	160
7	Modellbildung und hydraulische Stabilitätskriterien.....	163
7.1	Modellbildung zur hydraulischen Filterstabilität	165
7.1.1	Numerische Untersuchungen des maßgebenden hydraulischen Gradienten	166
7.1.2	Kritischer hydraulischer Gradient der Filterstabilität unter oszillierender Strömung	172
7.2	Hydraulische und geometrische Filterbemessung	184
7.2.1	Hydraulisches Filterkriterium.....	185
7.2.2	Geometrische Filterkriterien.....	189
7.3	Zusammenfassung der Bemessungsansätze und -kriterien	191
8	Zusammenfassung, Bewertung und Ausblick	195
8.1	Zusammenfassung und Bewertung der wichtigsten Ergebnisse.....	196
8.1.1	Bodenmechanische Prozesse und Erosionsprozesse	196
8.1.2	Geohydraulische Prozesse	197
8.1.3	Geometrische und hydraulischen Filterstabilität	197
8.2	Diskussion und Ausblick.....	200
	Schrifttum.....	205
	Anhang	217

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Aufbau eines zweischichtigen Deckwerks mit einer Filterlage in einer Sohl- und Böschungssicherung	1
Abb. 1.2: Übersicht der Ziele der Arbeit mit den maßgebenden Prozessen und Parametern.....	3
Abb. 2.1: Erosionsprozesse und Filterstabilität (Abschnitt 2.1) und welleninduzierte Strömungen in porösen Medien (Abschnitt 2.2)	5
Abb. 2.2: Systemskizze eines mehrlagigen Filteraufbaus in einer horizontalen Sohlsicherung	6
Abb. 2.3: Erosionsprozesse und deren Auswirkungen (modifiziert nach Fannin und Slangen (2014))	8
Abb. 2.4: Kontakterosion zwischen Basis- und Filterschicht unter oszillierender Strömung (ΔV , Δk).....	8
Abb. 2.5: Suffusion: Materialtransport der nichttragenden Kornfraktion im Porenraum (Δk , Δm)...	9
Abb. 2.6: Suffusion: Materialtransport im Porenraum einschließlich der tragenden Kornfraktionen (ΔV , Δk , Δm)	9
Abb. 2.7: Prozess der Verflüssigung mit a) Volumenausdehnung und b) Volumenreduzierung.....	10
Abb. 2.8: Einfluss der Ungleichförmigkeit U und der Lagerungsdichte auf die Porosität n (modifiziert nach Beyer und Schweiger (1969) aus Langguth und Voigt (2004))	11
Abb. 2.9: Kritischer hydraulischer Gradient nach de Graauw et al. (1983) zu gleichgerichteter und oszillierender Strömung orthogonal zur Schichtgrenze (modifiziert nach de Graauw et al. (1983))	18
Abb. 2.10: Systemskizze der Welleneinwirkung auf a) Sohlsicherung und b) Böschungssicherung	20
Abb. 2.11: Anwendungsbereiche der Wellentheorien (modifiziert nach SPM (1984))	22
Abb. 2.12: Welleninduzierter Porenwasserdruck und -strömung unter fortschreitenden Wellen (modifiziert nach Sumer und Fredsøe, 2002 und Groot et al., 2006)	24
Abb. 2.13: Komponenten des Porenwasserüberdrucks (nach Kudella et al. (2006))	25
Abb. 2.14: Prinzipskizze der Konsolidation.....	27
Abb. 2.15: Hauptgruppen der Bodenmodelle (modifiziert nach El Safti (2015))	28
Abb. 2.16: Beispiel des Spannungs-Dehnungsverlaufs bei Entlastung und Wiederbelastung (nach Kolymbas (2011a))	29
Abb. 2.17: Vereinfachte Skizze der lokalen und konvektiven Beschleunigung der Porenwasserströmung	35
Abb. 2.18: Schnittstellen und Übergänge bei Strömungen in porösen Medien.....	38
Abb. 2.19: Definitionsskizze der Untersuchungen dieser Arbeit mit a) welleninduzierte Orbitalströmung/Druckverteilung, b) Wellendruck an der Sohle, c) Wellendruck an der Filteroberkante, d) Porenwasserdruckverteilung im Untergrund, e) Porenwasserdruck an der Schichtgrenze (hydraulischer Gradient)	47
Abb. 2.20: Methodisches Vorgehen und Aufbau der Arbeit.....	49
Abb. 3.1: Wechseldurchströmungsanlage mit Versuchszelle (modifiziert nach Kayser et al., 2016), a) Versuchszelle mit Filterprobe, b) Steuerstand und Messdatenerfassung, c) Drucktank untere Randbedingung, d) Drucktank obere Randbedingung, e) Durchflussmessung untere Randbedingung, f) Durchflussmessung obere Randbedingung	51
Abb. 3.2: Systemskizze der Wechseldurchströmungsanlage (modifiziert nach Kayser, 2013), a) Versuchszelle mit Tragrahmen, b) Umgehungsleitung (Bypass) zum	

Volumenausgleich, c) unterer Drucktank (links), d) oberer Drucktank (rechts), e) untere Durchflussmessung (links), f) obere Durchflussmessung (rechts)	52
Abb. 3.3: Schnittdarstellungen und Details der Versuchszelle mit a) Zelle mit Tragrahmen und Zulauf, b) Schnittdarstellung der Versuchszelle, c) Detail der Kraftmessung, d) Detail der Auflaststeuerung	54
Abb. 3.4: Ansicht und Längsschnitt der Versuchszelle mit Messeinrichtungen und Abmessungen	56
Abb. 3.5: Hauptkomponenten der Strömungen in Kornfiltern (rot: durch Laborexperimente untersuchte Strömungskomponenten).....	58
Abb. 3.6: Schematische Darstellung des Vorgehens zur Ermittlung des hydrostatischen und hydrodynamischen Druckanteils zur Steuerung der Versuchsanlage	59
Abb. 3.7: Kornverteilungen der Filtermaterialien im Anfangszustand vor Versuchsdurchführung	61
Abb. 3.8: Untersuchte Filtermaterialien in der Versuchszelle der Wechseldurchströmungsanlage ..	62
Abb. 3.9: Vorgehen bei der Ermittlung der äquivalenten Wellenparameter	64
Abb. 3.10: Einordnung der Laboruntersuchungen in die Anwendungsbereiche der Wellentheorien (modifiziert nach SPM (1984)).....	66
Abb. 3.11: Definitionsskizze der Versuchszelle mit Ebenen der Druckmessung	67
Abb. 4.1: Übersicht der numerischen Modellierung geohydraulischer Prozesse in diesem Kapitel	73
Abb. 4.2: Ansätze zur geotechnische Modellierung (die in dieser Studie verwendete Ansätze sind in Grün hervorgehoben) nach El Safti, 2015	76
Abb. 4.3: Systemskizze zur Illustration der Unstetigkeit an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial (modifiziert nach Szymkiewicz, 2012)	78
Abb. 4.4: Systemskizze zum Aufbau des numerischen Modells zu der Gittergenerierung (Abschnitt 4.3.1) und der Definition der Randbedingungen (Abschnitt 4.3.2)	80
Abb. 4.5: Gitter der Versuchszelle mit a) isometrischer Darstellung und b) Draufsicht.....	81
Abb. 4.6: Optimierungsschritte des Gitters mit a) Gitterverfeinerung der Zellabstände nur an der Schichtgrenze, b) Erstellung einer Übergangszone (mit äquivalenter Durchlässigkeit $k_{f,eq}$) ober- und unterhalb der Schichtgrenze, c) progressive Gitterverfeinerung in Richtung der Schichtgrenze (Dimensionen in m)	81
Abb. 4.7: Räumliche und zeitliche Diskretisierung der Anfangs- und Randbedingungen.....	83
Abb. 4.8: Validierung des numerischen Modells geotechFoam anhand des totalen Porenwasserdrucks $p_{total,i}$ mit dem relativen Fehler gemäß Gleichung 2.45 in der Basis- und Filterschicht (Filterkonfiguration F1A3)	88
Abb. 4.9: Validierung des numerischen Modells geotechFoam anhand der hydraulischen Gradienten $i_{j,i}$ und der Filtergeschwindigkeit v_f mit dem relativen Fehler gemäß Gleichung 2.45 (Filterkonfiguration F1A3).....	90
Abb. 4.10: Einfluss des Sättigungsgrads S auf den hydraulischen Gradienten $i_{max(6,5)}$	95
Abb. 4.11: Einfluss der Porosität auf den Durchlässigkeitsbeiwert k_f (am Beispiel der Filterkonfiguration F1A2).....	96
Abb. 4.12: Einfluss des Durchlässigkeitsbeiwerts des Basismaterials $k_{f,B}$ auf den maximalen hydraulischen Gradienten im Basismaterial $i_{max(6,5)}$ bei gegebener Durchlässigkeit des Filtermaterials ($k_{f,F} = 1,6 \cdot 10^{-2}$ m/s)	96
Abb. 4.13: Einfluss des Durchlässigkeitsbeiwerts des Filtermaterials $k_{f,F}$ auf den hydraulischen Gradienten im Basismaterial $i_{max(6,5)}$ bei gegebener Durchlässigkeit des Basismaterials ($k_{f,B} = 6,8 \cdot 10^{-4}$ m/s)	97
Abb. 4.14: Einordnung der numerische Untersuchungen in die Anwendungsbereiche der Wellentheorien (modifiziert nach SPM, 1984).....	99
Abb. 5.1: Untersuchte Erosionsprozesse und bodenmechanische Prozesse im Labor	105
Abb. 5.2: Untersuchte Erosionsprozesse und bodenmechanische Prozesse in diesem Kapitel.....	106

Abb. 5.3: Kornverteilung des Basis- und Filtermaterials (in den Schichten a - f) vor und nach der Durchführung der Modellversuche (Filterkonfiguration F1A2).....	108
Abb. 5.4: Kornverteilung des Basis- und Filtermaterials (in den Schichten a - d) vor und nach der Durchführung der Modellversuche (Filterkonfiguration F1A3).....	109
Abb. 5.5: Kornverteilung des Basis- und Filtermaterials (in den Schichten a - f) vor und nach der Durchführung der Modellversuche (Filterkonfiguration F1B1).....	109
Abb. 5.6: Kornverteilung des Basis- und Filtermaterials (in den Schichten a - c) vor und nach der Durchführung der Modellversuche (Filterkonfiguration F1C1).....	110
Abb. 5.7: Kornverteilung des Basis- und Filtermaterials (in den Schichten a - e) vor und nach der Durchführung der Modellversuche (Filterkonfiguration F2A1).....	110
Abb. 5.8: Kornverteilung des Basis- und Filtermaterials (in den Schichten a - d) vor und nach der Durchführung der Modellversuche (Filterkonfiguration F2A2).....	111
Abb. 5.9: Suffosionsstabilität der Filterkonfigurationen nach Kenney & Lau (1985), mit dem Masseanteil F der Körner $< d$ und dem Masseanteil H zwischen Korndurchmesser d und $4 \cdot d$	112
Abb. 5.10: Kornverteilung der Filtermaterialien an der Schichtgrenze (35 - 40 cm) vor Versuchsdurchführung.....	114
Abb. 5.11: Kornverteilungen der Filtermaterialien an der Schichtgrenze (35 - 40 cm) nach Versuchsdurchführung.....	114
Abb. 5.12: Gemessene vertikale Verformung der Filteroberkante (F1A2) im Labor	116
Abb. 5.13: Beobachtete vertikale Verformung und Materialumlagerung des Basis- und Filtermaterials infolge Kontakterosion (Filterkonfiguration F1A2)	117
Abb. 5.14: Zeitreihen der vertikalen Verformung Δs (gemessen an der Filteroberkante) in Abhängigkeit der Wellenhöhe H_{eq} ($T_{eq} = 9,5$ s; $h_{eq} = 25,8$ m)	118
Abb. 5.15: Hydraulischer Gradient $i_{6,5}$ an der Schichtgrenze und vertikale Verformung im Vergleich zwischen gleichgerichteter und oszillierender Strömung.....	120
Abb. 5.16: Totalspannung, vertikale Verformung und visuelle Beobachtung der Verformung (Probe F1A2).....	121
Abb. 5.17: Klassifizierung der Filterstabilität anhand des Setzungsverlaufs und visueller Beobachtungen.....	122
Abb. 5.18: Porosität des untersuchten Filtermaterials vor der Versuchsdurchführung unter dem Einfluss der Lagerungsdichte D_F und der Ungleichförmigkeit U_F mit dem Ansatz nach Beyer und Schweiger (1969)	124
Abb. 6.1: Untersuchte geohydraulische Prozesse unter welleninduzierter Strömung in diesem Kapitel.....	127
Abb. 6.2: Vertikale Verteilung des relativen dynamischen Porenwasserdrucks $p_{dyn,i}/p_{dyn,max}$ innerhalb der Basis- und Filterschicht im Labor.....	130
Abb. 6.3: Vertikale Verteilung des relativen dynamischen Porenwasserdrucks $p_{dyn}/p_{dyn,max}$ im Basismaterial über die relative Tiefe z_i/L (Labordaten).....	131
Abb. 6.4: Zeitreihen der hydraulischen Gradienten in der Basisschicht und Filterschicht für verschiedene Wellenhöhen H_{eq} (Filter F1C1; $T_{eq} = 9,52$ s; $h_{eq} = 25,81$ m)	134
Abb. 6.5: Transmissionskoeffizient K_t in Abhängigkeit der äquivalenten Wellenhöhe H_{eq} (stabiler Filterzustand der Filterkonfiguration F1C1 ohne Materialumlagerungen, $T_{eq} = 7,25$ s; $9,52$ s; $10,99$ s; $12,50$ s)	135
Abb. 6.6: Einfluss des Transmissionskoeffizienten K_t auf den hydraulischen Gradient $i_{6,5}$ an der Schichtgrenze (numerische Simulation mit der Phasenverschiebung $\Delta t = 0,7$ ermittelt aus Laborexperimenten mit Filterkonfiguration F1C1, siehe auch Abschnitt 4.5.2).	137

Abb. 6.7: Einfluss der Phasenverschiebung $\Delta t/T_{eq}$ auf den hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ an der Schichtgrenze (numerische Simulation mit $K_t = 0,147$ ermittelt aus Laborexperimenten mit F1C1 für $H_{eq} = 9,44$ m, siehe Abbildung 6.5)	138
Abb. 6.8: Einfluss des Abstands zur unteren Randbedingung bzw. der Dicke der Basisschicht SD_B auf den hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ (numerische Simulation mit $K_t = 0$ und $\Delta t = 0$ s)	139
Abb. 6.9: Einfluss des Brecherindex H/h auf den hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ (Labordaten)	141
Abb. 6.10: Einfluss der Wellensteilheit H/L auf den hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ (Labordaten)	141
Abb. 6.11: Zusammenhang zwischen $[H^2/(h \cdot L)]^{0,5}$ und dem hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ (Labordaten).....	142
Abb. 6.12: Einfluss des Gradienten I' (an der Filteroberkante) auf den hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial	144
Abb. 6.13: Zeitreihen der Filtergeschwindigkeit v_f für drei verschiedene Wellenhöhen H_{eq} (Labordaten).....	147
Abb. 6.14: Einfluss der äquivalenten Wellenhöhe H_{eq} auf die maximale Filtergeschwindigkeit $v_{f,\max}$ (Filterkonfigurationen F1A2, F1A3, F1B1, F1C1, F2A1, F2A2) (Labordaten).....	147
Abb. 6.15: Einfluss des hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ auf die kornbezogene Reynolds-Zahl Re^* (Labordaten im stabilen Filterzustand ohne Materialbewegung)	149
Abb. 6.16: Einfluss des Sättigungsgrads S auf die Filtergeschwindigkeit $v_{f,\max}$ (numerische Simulation)	149
Abb. 6.17: Numerische Untersuchungen zum Einfluss des Sättigungsgrads S auf die relative Durchlässigkeit und relative Filtergeschwindigkeit ($H_{eq} = 6,00$ m; $T_{eq} = 9,52$ s; $h_{eq} = 25,80$ m)	150
Abb. 6.18: Zusammenhang zwischen dem hydraulischen Gradienten i in der Basis- und Filterschicht und der Filtergeschwindigkeit v_f (Labordaten).....	152
Abb. 6.19: Zusammenhang zwischen hydraulischem Gradienten i und Filtergeschwindigkeit v_f im stabilen Filterzustand (ohne Materialumlagerung) für verschiedene Filterkonfigurationen im Überblick: a) in der Filterschicht $i_{5,1}$ (skaliert auf $i_{5,1}: \pm 0,8$), b) unterhalb der Schichtgrenze $i_{6,5}$ (skaliert auf $i_{5,1}: \pm 6,0$), und c) in der Basisschicht $i_{9,5}$ (skaliert auf $i_{5,1}: \pm 6,0$) für $T_{eq} = 9,52$ s; $h_{eq} = 25,8$ m (Labordaten)	153
Abb. 7.1: Zusammenführung der Ergebnisse zur Modellbildung der hydraulischen Filterstabilität unter welleninduzierter Strömung orthogonal zur Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial.....	163
Abb. 7.2: Übersicht des methodischen Vorgehens zur hydraulischen Filterbemessung	165
Abb. 7.3: Einfluss des Brecherindex H/h auf den hydraulischen Gradienten $i_{\max(5,6)}$ für drei Filtermaterialien mit verschiedenen Durchlässigkeitsbeiwerten $k_{f,F(i)}$	166
Abb. 7.4: Einfluss der Wellenperiode T auf den hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ (Simulation)..	168
Abb. 7.5: Einfluss des einwirkenden Gradienten I' auf den maximalen hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial	168
Abb. 7.6: Einfluss des Durchlässigkeitsbeiwertes des Filtermaterials (nach Darcy) auf den Koeffizienten a_k (aus Gleichung 7.2).....	170
Abb. 7.7: Klassifizierung der Filterstabilität mit den drei Bereichen statisch stabil, Bewegungsbeginn und Kon-takterosion (instabil).....	172
Abb. 7.8: Grenzen der Stabilitätszustände des Filters: obere Grenze der statischen Stabilität, Bewegungsbeginn und obere Grenze der dynamischen Stabilität	173

Abb. 7.9: Einfluss der Lagerungsdichte D_F und Porosität n_F auf den kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} zum Bewegungsbeginn für die untersuchten Filtermaterialien auf dem Basismaterial $d_{50B} = 0,25$ mm nach dem Ansatz von Beyer und Schweiger (1969)..	174
Abb. 7.10: Kritischer hydraulischer Gradient i_{krit} im Einfluss verschiedener Abstandsverhältnisse und Basismaterialien im Vergleich mit den Ergebnissen a) nach Davidenkoff (1967), Ziems (1968) und b) nach de Graauw et al. (1983)	176
Abb. 7.11: Vergleich des kritischen hydraulischen Gradienten für das untersuchte Basismaterial ($d_{50B} = 0,25$ mm) durch lineare Interpolation ¹⁾ der Ergebnisse nach de Graauw et al. (1983).....	178
Abb. 7.12: Einfluss der Abstandsverhältnisse $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$ und $d_{15F}/d_{85B} \cdot n_F$ auf den kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} zu den Grenzen der statischen Stabilität, des Bewegungsbeginns und der dynamischen Stabilität (für mittlere Lagerungsdichte des Filtermaterials D_F)	180
Abb. 7.13: Definitionsskizze zur hydraulischen Bemessung eines Kornfilters unter welleninduzierter schichtorthogonaler Strömung in einer horizontalen Filterschicht auf dem Meeresgrund	184
Abb. 7.14: Grafische Ermittlung des zulässigen Abstandsverhältnisses $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$ (für das Basismaterial $d_{50B} = 0,25$ mm).....	185
Abb. 7.15: Vorgehen für die Berechnung des zulässigen Abstandsverhältnisses d_{15F}/d_{50B}	188
Abb. 7.16: Vergleich verschiedener geometrischer Filterkriterien für oszillierende Strömungen am Beispiel des untersuchten Basis- und Filtermaterials (F1A2, $d_{50B} = 0,25$ mm; $U_B = 1,29$; $d_{15F} = 1,20$ mm; $U_F = 5,93$)	189

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Ausgewählte geometrische Filterkriterien mit Randbedingungen der Untersuchungen...	13
Tab. 2.2: Ausgewählte hydraulische Filterkriterien mit den untersuchten Strömungskomponenten	17
Tab. 2.3: Übersicht der Wellenparameter nach Dean und Dalrymple, 1991.....	21
Tab. 2.4: Untersuchungen zu den Forchheimer Koeffizienten a und b unter stationärer Strömung nach Burcharth und Andersen (1995), Gent (1992), Muttray (2000) und Lin (2008).	33
Tab. 2.5: Vergleich numerischer Modelle für Strömungen in porösen Medien mit Vor- und Nachteilen.....	43
Tab. 3.1: Versuchsprogramm mit Wellensteilheit H/L in Abhängigkeit der (äquivalenten) Wellenhöhe H und der Wellenperiode T für die Wassertiefe $h = 25$ m.....	60
Tab. 3.2: Übersicht der relativen Wassertiefe h/L im Versuchsprogramm mit der Zuordnung zum Brecherindex H/h und der Wellensteilheit H/L	60
Tab. 3.3: Geometrische und geotechnische Filtereigenschaften	62
Tab. 4.1: Anforderung an das numerische Modell und verfügbare Lösungen	75
Tab. 4.2: Kalibrierung des numerischen Modells und Vergleich der Durchlässigkeitsbeiwerte mit den Abweichungen zu den Durchlässigkeitsbeiwerten k_f nach Hazen und aus den Laborexperimenten	84
Tab. 4.3: Hydraulische und geotechnische Parameter zur Validierung des numerischen Modells..	87
Tab. 4.4: Validierung des numerischen Modells anhand der hydraulischen Gradienten und der Filtergeschwindigkeit im Laborexperiment.....	91
Tab. 4.5: Testprogramm für die numerische Sensitivitätsanalyse.....	94
Tab. 4.6: Maximale Abweichung des hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ vom Mittelwert in Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwerts k_f	97
Tab. 4.7: Hydraulische Parameter (als äquivalente Wellenparameter H_{eq} und T_{eq} mit h_{eq}) des Testprogramms der numerischen Parameterstudie	99
Tab. 5.1: Abstandsverhältnis und Ungleichförmigkeit des untersuchten Filtermaterials.....	107
Tab. 5.2: Veränderung der geometrischen Parameter an der Schichtgrenze (35 - 40 cm) zwischen Anfangs- (t_0) und Endzustand (t_n).....	113
Tab. 5.3: Kritische hydraulische Gradienten in Abhängigkeit des Filterzustands	123
Tab. 6.1: Parameter der Druckverteilung nach Gleichung 6.1 (Filter F2A2, $h_{eq} = 25,8$ m)	132
Tab. 6.2: Koeffizient a_k für zwei Filtermaterialien (F1B1, F1C1) unter Berücksichtigung der Filterdurchlässigkeit $k_{f,F}$ und der Filterauflast p_A ($h = 25$ m).....	144
Tab. 6.3: Forchheimer-Koeffizienten und Widerstandskoeffizienten der Filterkonfigurationen (unter oszillierender Strömung mit $H_{eq} = 6,4$ m, $T_{eq} = 9,52$ s, $h_{eq} = 25,8$ m) (Labordaten).....	155
Tab. 6.4: Vergleich der Widerstandskoeffizienten α und β unter Berücksichtigung der verschiedenen charakteristischen Korndurchmessers d_c (siehe auch Tabelle 2.4)	156
Tab. 7.1: Parameter der numerischen Parameterstudie	166
Tab. 7.2: Proportionalitätsfaktor a_i in Gleichung 7.1 in Abhängigkeit der Wellenperiode und der Durchlässigkeit des Filters (für ein Basismaterial mit $k_{f,B} = 6,8 \cdot 10^{-4}$ m/s, $d_{50B} = 0,25$ mm und einer Filterschichtdicke $SD_F = 0,40$ m)	167
Tab. 7.3: Koeffizient a_k aus Gleichung 7.3 für verschiedene Durchlässigkeitsbeiwerte des Filters $k_{f,F}$ (Schichtdicke des Filters $SD_F = 0,40$ m; Durchlässigkeit des Basismaterials $k_{f,B} = 6,8 \cdot 10^{-4}$ m/s)	170

Tab. 7.4: Auswahl geeigneter Untersuchungen zum Vergleich der kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} aus dieser Studie (siehe auch Abschnitt 2.1.5)	175
Tab. 7.5: Koeffizient $a_{D,i}$ und Exponent $b_{D,i}$ der Gleichungen 7.7 und 7.8 für drei Stabilitätsgrenzen für mittlere Lagerungsdichte $D_{F,\text{mittel}}$	181
Tab. 8.1: Übersicht der wichtigsten Formeln zur Ermittlung der Filterstabilität	199

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Beschreibung
A	-	Abstandsverhältnis zwischen charakteristischen Korngrößen des Basis- und Filtermaterials
A ₅₀	-	Abstandsverhältnis zwischen den mittleren Korndurchmessern d ₅₀ des Basis- und Filtermaterials
A _{zul}	-	Zulässiges Abstandsverhältnis A
a	bar	Wellenamplitude
a	s/m	Forchheimer-Koeffizient a für laminaren Fließwiderstand
a _D	-	Koeffizient des kritischen hydraulischen Gradienten i _{krit}
a _k	-	Koeffizient des maximalen hydraulischen Gradienten i _{max}
b	s ² /m ²	Forchheimer-Koeffizient b für turbulenten Fließwiderstand
b _D	-	Exponent des kritischen hydraulischen Gradienten i _{krit}
C _C	-	Krümmungszahl
c	s ² /m	Forchheimer-Koeffizient c für zusätzliche Trägheitskräfte
c	-	Dimensionsloser Formparameter der Porengeometrie nach Hazen
c	m/s	Lokale Wellenschnelligkeit
c ₀	m/s	Wellengeschwindigkeit
c'	N/m ²	Kohäsion
c _t	-	Koeffizient des Übergangsbereichs nach Lin und Karunaratna (2007)
c _μ	-	Konstante der Wirbelviskosität
D	-	Lagerungsdichte (dichteste, mittlere, lockerste Lagerung)
d	m	Korndurchmesser (d _F des Filters, d _B der Basis)
d _c	m	Charakteristischer Korndurchmesser
d _{eq}	m	Massenäquivalenter Korndurchmesser in Kugelform
d _i	m	Korndurchmesser bei i % Massendurchgang
d _p	m	Porendurchmesser
d*	m	Charakteristischer Korndurchmesser nach Shih (1991)
d _{Zelle}	m	Innendurchmesser der Versuchszelle
E	N/m ²	Elastizitätsmodul
e	-	Porenzahl
F	%	Massendurchgang der feinen Kornfraktion
f	s ⁻¹	Frequenz
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
H	m	Korndurchmesser der groben Kornfraktion
H	m	Lokale Wellenhöhe
H _b	m	Wellenhöhe im Brechpunkt
H _{eq}	m	Äquivalente Wellenhöhe
H ₀	m	Wellenhöhe im Tiefwasser
H _i	m	Wellenhöhe im Punkt i
H/h	-	Brecherindex
H/L	-	Wellensteilheit

Symbol	Einheit	Beschreibung
H_M	%	Massenanteil zwischen der Korngröße d und $4 \cdot d$
h	m	Wassertiefe
h_b	m	Wassertiefe im Brechpunkt
h_{eq}	m	Äquivalente Wassertiefe
h/L	-	Relative Wassertiefe
Δh	m	Wasserspiegeldifferenz
I'	-	Einwirkender Gradient an der Oberkante des Filters
i	-	Hydraulischer Gradient $\Delta h/\Delta l$
$i_{(j,j+1)}$	-	Hydraulischer Gradient zwischen der Position j und $j+1$
i_{krit}	-	Kritischer hydraulischer Gradient an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial
i_{max}	-	Maximaler hydraulischer Gradient an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial
KC	-	Keulegan-Carpenter-Zahl
K	m^2	Permeabilität
K_f	N/m^2	Kompressionsmodul des Porenfluids
K_s	-	Shoaling-Faktor
K_t	-	Koeffizient des dynamischen Drucks ("Transmissionskoeffizient")
k	Nm	Kinetische Energie
k_f	m/s	Durchlässigkeitsbeiwert
$k_{f,eq}$	m/s	Äquivalenter spezifischer Durchlässigkeitsbeiwert
L	m	Lokale Wellenlänge
L_b	m	Wellenlänge im Brechpunkt
L_{eq}	m	Äquivalente Wellenlänge
L_i	m	Wellenlänge im Punkt i
L_0	m	Wellenlänge im Tiefwasser
Δl	m	Sickerweg (zwischen Position z_i und z_{i+1})
m	kg	Masse
n	-	Porosität (Hohlraumvolumen/Gesamtvolumen; n_F des Filters, n_B der Basis)
p_i	bar	Druck an der Position i
p_A	N/m^2	Flächenlast des Filters (Filterauflast)
p_{stat}	bar	Hydrostatischer Druck
p_{dyn}	bar	Hydrodynamischer Druck
$p_{dyn,max}$	bar	Maximaler hydrodynamischer Druck
p_{min}	bar	Druckminimum
p_{max}	bar	Druckmaximum
p_z	bar	Druck in der Tiefe z
Δp	bar	Druckdifferenz
Q	m^3/s	Durchfluss
q	m^3/s	Spezifischer Durchfluss
R	m	Hydraulischer Radius
R^2	-	Determinationskoeffizient (Bestimmtheitsmaß)
r	-	Korrelationskoeffizient
r_{Zelle}	m	Radius der Versuchszelle

Symbol	Einheit	Beschreibung
Re	-	Reynoldszahl
Re^*	m	Kornbezogene Reynoldszahl
S_t	N	Senkenterm (Vektor) der Bodenphase
S	%	Sättigungsgrad (S_F des Filters, S_B der Basis)
SD	m	Schichtdicke (SD_F des Filters, SD_B der Basis)
Δs	m	Vertikale Verformung
$\tan \alpha$	-	Böschungsneigung
t	s	Zeitpunkt
Δt	s	Zeitdifferenz (Phasenverschiebung)
t_i	s	Zeit zum Zeitpunkt i
T	s	Lokale Wellenperiode
T_{eq}	s	Äquivalente Wellenperiode
T_m	s	Mittlere Wellenperiode
T_p	s	Peak-Wellenperiode
U	m/s	Amplitude der Fließgeschwindigkeit
U_i	-	Ungleichförmigkeit (U_F des Filters, U_B der Basis)
u	-	Vektor der Verformung
u	bar	Porenwasserdruck
u_0	bar	Initialer Porenwasserdruck
u_t	bar	Transienter Porenwasserdruck
u_r	bar	Residualer Porenwasserdruck
u_{krit}	m/s	Kritische Fließgeschwindigkeit
u^*_{krit}	m/s	Kritische Schubspannungsgeschwindigkeit
V	m ³	Volumen (der Bodenmatrix)
v	m/s	Geschwindigkeit
v_f	m/s	Filtergeschwindigkeit
$v_{f,krit}$	m/s	Kritische Filtergeschwindigkeit
$v_{f,max}$	m/s	Maximale Filtergeschwindigkeit
x	m	Horizontale Position
x_i		Unabhängige Variable x
Δx	%	Relativer Fehler
y_i		Abhängige Variable y
z	m	Tiefe, Höhenlage
z/L	-	Relative Tiefe

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Beschreibung
α	-	Widerstandskoeffizient der laminaren Strömungskomponente
β	-	Widerstandskoeffizient der turbulenten Strömungskomponente
γ_w	N/m ³	Wichte des Wassers
γ_s	N/m ³	Wichte des Bodens
ε	-	Dehnung
ε_v	-	Volumenrische Dehnung der Bodenmatrix
ε	-	Dissipationsrate
θ	-	Shields-Parameter
θ	-	Phasenwinkel
η_w	kg/(m·s)	Dynamische Viskosität des Fluids
η	m	Wellenauslenkung
η_{eq}	m	Äquivalente Wellenauslenkung
μ	kg/(m·s)	Dynamische Viskosität
μ_t	kg/(m·s)	Wirbelviskosität
ν	m ² /s	Kinematische Viskosität
ξ	-	Brandungsparameter
π	-	Kreiszahl
ρ_s	kg/m ³	Rohdichte des Einzelkorns
ρ'_s	kg/m ³	Rohdichte des Einzelkorns unter Auftrieb
ρ_w	kg/m ³	Rohdichte des Fluids (Wasser)
σ	-	Standardabweichung
$\sigma'(x)$	-	Variationskoeffizient der Variablen x (relative Standardabweichung)
σ	N/m ²	Totale Spannung
σ'	N/m ²	Effektive Spannung
τ	N/m ²	Schubspannung
$\tau_{0,max}$	N/m ²	Maximale Sohlschubspannung
φ	-	Reibungswinkel
ω	s ⁻¹	Turbulente Frequenz

Abkürzungsverzeichnis

Kürzel	Beschreibung
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
CEM	Coastal Engineering Manual
CETMEF	Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales
CIRIA	Construction Industry Research and Information Association
CUR	Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving
DEM	Diskrete-Elemente-Methode
FEM	Finite-Elemente-Methode
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FVM	Finite-Volumen-Methode
LBM	Lattice-Boltzmann-Methode
LWI	Leichtweiß-Institut für Wasserbau
MAK	Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Bundeswasserstraßen
MBB	Merkblatt Materialtransport im Boden
MPM	Material Point Method
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics
SPM	Shore Protection Manual
RANS	Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen
VRANS	Volumengemittelte Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen
WDA	Wechseldurchströmungsanlage

1.1 Motivation

Hydraulische Filterkriterien unter Berücksichtigung von schichtorthogonalen welleninduzierten Strömungen wurden bisher nicht ausreichend erforscht und Ansätze, in denen kritische Stabilitätskriterien der tatsächlichen hydraulischen Belastung mit Wellenparametern (Wellenhöhe H , Wellenperiode T , Wassertiefe h) in Verbindung gebracht werden, liegen nicht vor. In der Ingenieurpraxis werden daher immer noch geometrische Filterkriterien für gleichgerichtete Strömungen auf der Grundlage der Untersuchungen von Terzaghi sowie weiterer ähnlicher Untersuchungen angewendet. Durch einschichtige Filteraufbauten können diese Filterkriterien nicht erfüllt werden, sodass unwirtschaftliche mehrschichtige Filter erforderlich sind. Weiterhin ist bislang der Nachweis der Stabilität des Filters unter der Einwirkung von welleninduzierter (oszillierender) Strömung für geometrische Filterkriterien (im Naturmaßstab) noch nicht erbracht. Darüber hinaus bestehen zu hydraulischen und geohydraulischen Prozessen von Kornfiltern folgende allgemeine Wissenslücken, die im Kapitel 2 genauer präzisiert werden:

- Porenwasserdruckverteilung, hydraulischer Gradient und Filtergeschwindigkeit im Basis- und Filtermaterial unter oszillierender Strömung,
- Bodendynamische Prozesse, Spannungsverteilung und Verformungen im Filteraufbau (Spannungs-Dehnungs-Verhalten),
- Kritische hydraulische Parameter des Bewegungsbeginns (Kontakterosion) unter welleninduzierter Strömung sowie Definition und Bewertung der Filterstabilität (statische Stabilität, dynamische Stabilität, Filterversagen),
- Interaktion der Erosionsprozesse, des dynamischen Verhaltens, des Fließwiderstands und der Porenwasserdruckverteilung im Filteraufbau.

1.2 Zielsetzung

Das Hauptziel dieser Studie ist eine substantiell verbesserte Einsicht in die Wechselwirkung zwischen den geohydraulischen Prozessen in Kornfiltern auf der Grundlage experimenteller, theoretischer und numerischer Untersuchungen und, basierend auf diesem verbesserten Prozessverständnis, die Entwicklung von Bemessungsansätzen für Kornfilter unter schichtorthogonaler welleninduzierter Strömung.

Diese Untersuchungen dienen folgenden spezifischen Zielen:

- (i) Verbesserung des Verständnisses der hydraulischen, geotechnischen und geohydraulischen Prozesse im Filter unter schichtorthogonaler welleninduzierten Strömungen und Porenwasserdrücken,
- (ii) Beschreibung des Porenwasserdrucks, der Fließgeschwindigkeit und des Fließwiderstands im Filteraufbau,
- (iii) Erfassung der kritischen hydraulischen Gradienten und Filtergeschwindigkeiten, die zum Bewegungsbeginn und zum Versagen des Filters führen und
- (iv) Modellbildung und Herleitung von generischen Bemessungsansätzen für Kornfilter unter Wellenbelastungen.

Diese Ziele sind mit den wichtigsten Prozessen und Parametern in Abbildung 1.2 zusammengefasst.

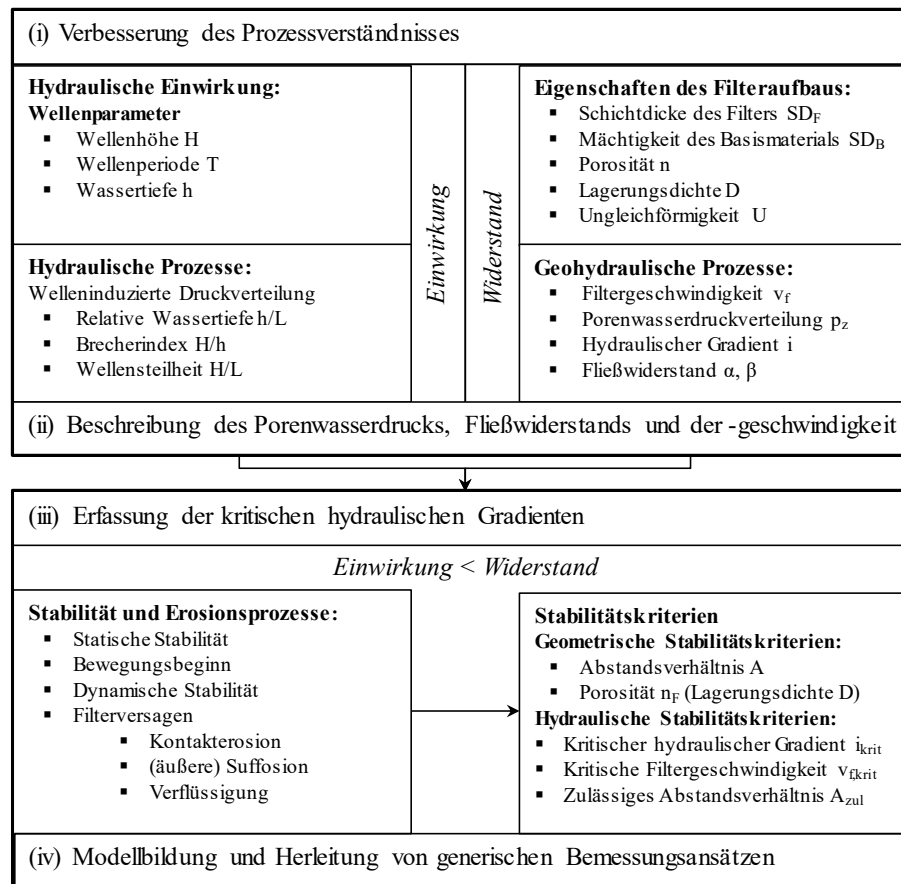


Abb. 1.2: Übersicht der Ziele der Arbeit mit den maßgebenden Prozessen und Parametern

1.3 Methodik

Zur Erreichung der in Abschnitt 1.2 definierten Ziele sind umfangreiche systematische Laborexperimente sowie weitere theoretische und numerische Untersuchungen erforderlich. Diese wissenschaftliche Studie ist daher in vier Schritte unterteilt:

1. Systematische Analyse des Wissensstands zur Ermittlung geeigneter Ansätze und Konzepte sowie vorhandener Wissenslücken zur Filterstabilität unter welleninduzierter Strömung,
2. Versuchsaufbau und Optimierung der Laborexperimente sowie Versuchsdurchführung,
3. Aufbau und Validierung sowie Anwendung und Optimierung des numerischen Modells,
4. Herleitung von Stabilitätskriterien zur hydraulischen Bemessung von Kornfiltern.

Die Zielsetzung und Methodik werden nach ausführlicher Analyse des Wissensstands in Abschnitt 2.4 spezifiziert.

2 Wissensstand und theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Analyse und Bewertung der relevanten Prozesse zur Herleitung von Stabilitätskriterien für die geometrische und hydraulische Bemessung von Kornfiltern unter welleninduzierter Strömung durchgeführt. Zu diesem Zweck werden der Wissensstand sowie der theoretische Hintergrund zu folgenden Punkten zusammenfassend dargestellt und kritisch diskutiert: (i) Erosionsprozesse und Filterstabilität, (ii) welleninduzierte Strömungen in porösen Medien, (iii) numerische Modellierung hydrodynamischer und bodendynamischer Prozesse sowie (iv) Präzisierung der Zielsetzung und Methodik.

In Abschnitt 2.1 werden die Erosionsprozesse und die Filterstabilität in Hinblick auf einen einschichtigen Filteraufbau zum Schutz einer Sohlsicherung gegen Kontakterosion mit den vorhandenen Stabilitätskonzepten und Bemessungsansätzen zusammengefasst und für die Fragestellung dieser Arbeit bewertet (Abbildung 2.1). Mit dieser Bewertung erfolgt die Entwicklung einer Methodik, um die vorhandenen Wissenslücken zur hydraulischen Filterstabilität unter schichtorthogonaler welleninduzierter Strömung in horizontalen Filterschichten zu schließen.

In Abschnitt 2.2 werden hierzu die theoretischen Grundlagen und der Wissensstand zu welleninduzierten hydraulischen Prozessen außerhalb und innerhalb poröser Medien zur Ermittlung der maßgebenden hydraulischen Einwirkung des Filteraufbaus analysiert (Abbildung 2.1). Dabei werden die welleninduzierte Strömungs- und Druckverteilung unter fortschreitenden Wellen, die welleninduzierte Porenwasserdruckverteilung im Meeresboden sowie die Fließwiderstände in porösen Medien einbezogen.

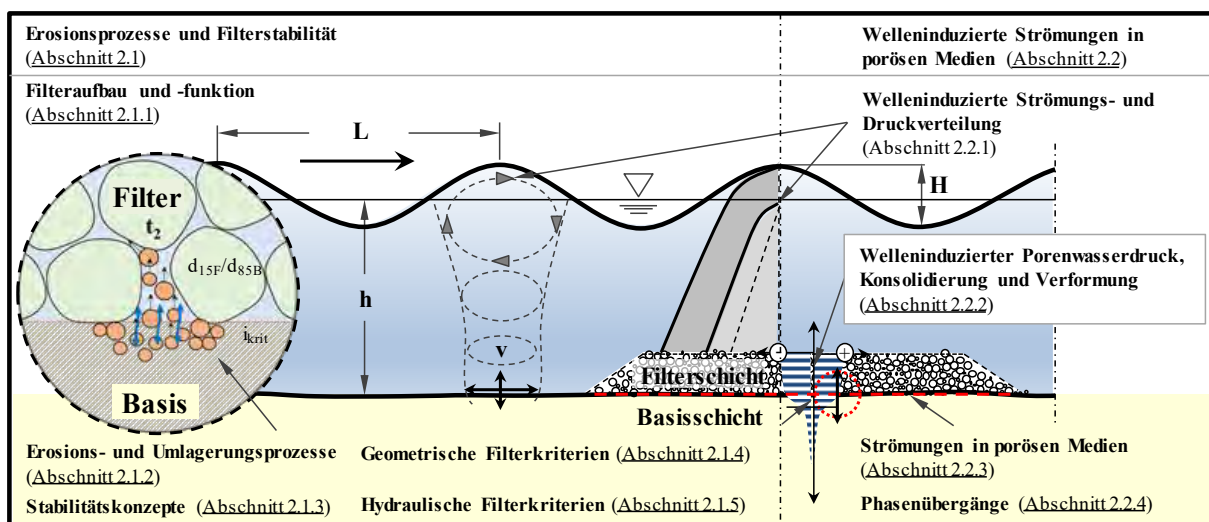


Abb. 2.1: Erosionsprozesse und Filterstabilität (Abschnitt 2.1) und welleninduzierte Strömungen in porösen Medien (Abschnitt 2.2)

In Abschnitt 2.3 wird der Stand der numerischen Modellierung von hydrodynamischen und bodendynamischen Prozessen diskutiert, um geeignete Modelle zur Untersuchung der hydraulischen Prozesse im Filteraufbau zu identifizieren. Dazu werden unterschiedliche Konzepte zur Modellierung von Strömungen in porösen Medien vergleichend analysiert.

Zum Abschluss des Kapitels werden die identifizierten Wissenslücken aus der Analyse und Bewertung des Wissensstands in Abschnitt 2.4 zur Präzisierung der Zielsetzung und Methodik zusammengefasst. Hieraus werden das methodische Vorgehen und das Arbeitsprogramm dieser Studie abgeleitet.

2.1 Erosionsprozesse und Filterstabilität

Kornfilter bestehen häufig aus rundkörniger oder gebrochener Gesteinskörnung und werden mit charakteristischen Parametern des Einzelkorns und der Kornverteilung definiert. Die Aufgaben eines Kornfilters sind Trennung und Rückhalt von angrenzenden feineren Materialien, Erhöhung der effektiven Spannung gegenüber dem wirkenden Porenwasserdruck durch höhere Auflast sowie die Entwässerung durch eine ausreichende Durchlässigkeit. In Deckwerken haben Kornfilter zwei angrenzende Schichten zu denen sie jeweils filterstabil ausgelegt werden müssen (Untergrund, Filter-/Deckschicht). Das Versagen von Deckwerken durch Einsinken und Abgleiten sowie infolge schädigender Spannungen und damit verbundener Verformungen ist durch einen geeigneten Filteraufbau zu verhindern.

Im Folgenden wird eine Übersicht der folgenden Aspekte gegeben (i) genereller Aufbau von Kornfiltern (Abschnitt 2.1.1) mit den wichtigsten strukturellen und geometrischen Eigenschaften, (ii) Erosions- und Umlagerungsprozesse (Abschnitt 2.1.2), (iii) wichtigste Bemessungskonzepte (Abschnitt 2.1.3) mit (iv) geometrischen Filterkriterien (Abschnitt 2.1.4) und (v) hydraulischen Filterkriterien (Abschnitt 2.1.5). Die Kontakterosion wird dabei als Hauptprozess in Bezug auf die hydraulische Stabilität von Kornfiltern betrachtet.

2.1.1 Filteraufbau und -funktion

Der Aufbau granularer Filter für den Einsatz im Wasserbau wird entsprechend der örtlichen Gegebenheiten und der hydraulischen Randbedingungen dimensioniert. Kornfilter in Deckwerksaufbauten erfüllen verschiedene Zwecke zu unterschiedlichen Bau- und Bestandsphasen. Der Filter wird neben den strukturellen und geometrischen Eigenschaften über die Materialeigenschaften des Einzelkorns und des Korngemisches bestimmt.

a) Aufbau eines Kornfilters: Der Filteraufbau kann in ein- und mehrlagige Filter (Stufenfilter) unterteilt werden. Einlagige Filter mit einer Ungleichförmigkeit $U > 5$ werden als Mischkornfilter bezeichnet (MAK, 2013). Zusätzlich zur inneren Stabilität des Filters gegenüber Entmischung (Segregation) und innerer Erosion ergeben sich in Abhängigkeit der angrenzenden Materialien weitere Anforderungen an die Filterbeschaffenheit. Neben der Anzahl der erforderlichen Filterstufen ist auch die Schichtdicke SD von großer Bedeutung (Abbildung 2.2).

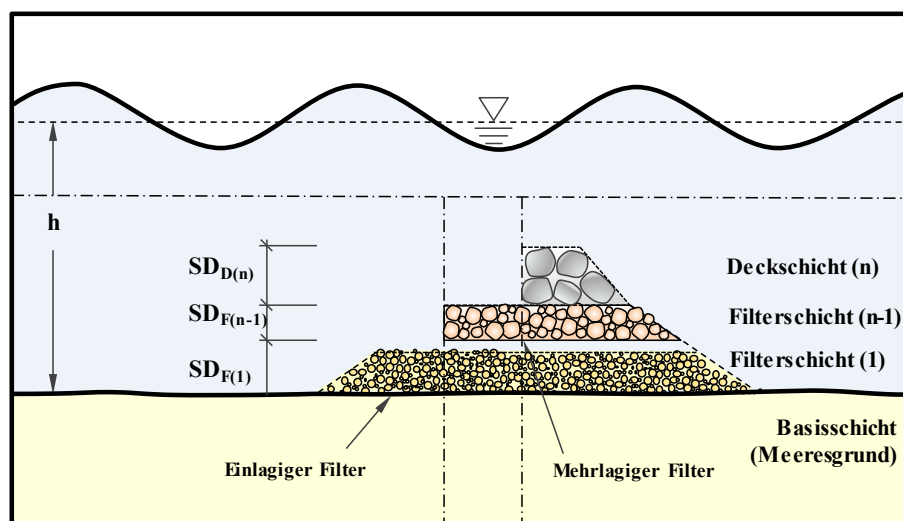


Abb. 2.2: Systemskizze eines mehrlagigen Filteraufbaus in einer horizontalen Sohlsicherung

Die Schichtdicke beeinflusst die Auflast und somit auch die effektiven Spannungen sowie die Dämpfung der hydraulischen Einwirkung. Weiterhin ergeben sich Mindestanforderungen an die Schichtdicke durch Einbauverfahren und durch die geforderten Toleranzen beim Einbau unter Wasser. Zusätzliche Anforderungen an die Schichtdicke können sich durch die Logistik beim Einbau ergeben, wie z. B. ein freiliegender Filter, der zeitweilig ohne Schutz durch weitere Filterlagen oder eine Deckschicht verbleibt (Abbildung 2.2).

b) Filterwirksamkeit: Bei der Wirksamkeit eines Kornfilters kann zwischen hydraulischer und mechanischer Filterwirksamkeit unterschieden werden (MAK, 2013):

- *Hydraulische Filterwirksamkeit:* Gewährleistung einer ausreichend hohen Durchlässigkeit, um anstehendes und zuströmendes Wasser abzuführen
- *Mechanische Filterwirksamkeit:* Rückhaltevermögen des Filters gegenüber angrenzenden Bodenschichten durch geeignete Porengeometrie

Zur Erfüllung der Filterwirksamkeit sind die Durchlässigkeit, die Kornverteilung (Abstandsverhältnisse, Ungleichförmigkeit), Schichtdicke, Filterauflast, Filterstufen sowie die Segregation (Entmischung) beim Einbau unter Wasser zu beachten. Die Bemessungskonzepte und -ansätze von Kornfiltern für den Einsatz in Sohl- und Böschungssicherungen werden in den Abschnitten 2.1.3 bis 2.1.5 erläutert.

c) Eigenschaften von Einzelkorn und Korngemisch: Zum Verständnis der bodenmechanischen und geohydraulischen Eigenschaften eines Kornfilters ist es sinnvoll, den Aufbau eines Filters vom Einzelkorn bis zum Korngemisch zu beschreiben. Das Einzelkorn kann anhand der Kornform, Oberflächenrauheit, Korndichte und -wichte beschrieben werden und bestimmt damit die Reibung und Spannungsübertragung zu den benachbarten Körnern.

Die Eigenschaften des Einzelkorns haben einen Einfluss auf die Porengeometrie, ausgedrückt durch die Porosität, Porenzahl oder den Verwindungsgrad der Porenstruktur (Tortuosität) im Haufwerk. Aus der Kornverteilung des Korngemisches können wichtige Größen, wie die Ungleichförmigkeit U , die Krümmung C sowie charakteristische Korngrößen d_c abgeleitet werden. Die Porosität steht in engem Zusammenhang mit der Schütt-, bzw. Lagerungsdichte und kann im Labor für eine Probe ermittelt werden (Ziems, 1968; Beyer und Schweiger, 1969). Der Zusammenhang zwischen Ungleichförmigkeit, Lagerungsdichte und Porosität ist in Beyer und Schweiger (1969) dargestellt. Eine wichtige Größe zur Beschreibung des wasserverfügbaren Porenraums ist die Kapillarität und der Sättigungsgrad bzw. der Luftgehalt im Porenraum.

2.1.2 Erosions- und Umlagerungsprozesse

Die geotechnischen und hydraulischen Eigenschaften bestimmen das geohydraulische Verhalten eines Filteraufbaus. Nach Überschreiten einer Grenzbedingung durch die hydraulische Einwirkung wird der Widerstand des Kornfilters gegenüber der Erosion überwunden. Bei der Definition des Bewegungsbeginns wird zwischen Materialbewegung im Porenraum und Materialbewegung der tragenden Kornmatrix unterschieden. Der hieraus resultierende Materialtransport kann anhand der transportierten Kornfraktionen und der Auswirkungen charakterisiert werden. Die maßgebenden geohydraulischen Prozesse in Bezug auf die Stabilität von Kornfiltern sind:

- Kontakterosion, Fugenerosion, Fluidisierung, (lokale) Verflüssigung,
- Infiltration, Kolmation und
- Interne Erosion, Kontaktsuffosion

Diese Prozesse stehen in Wechselwirkung mit Volumenänderungen, Massenänderungen und Änderungen der Durchlässigkeit, wie in Abbildung 2.3 nach Fannin und Slangen (2014) dargestellt.

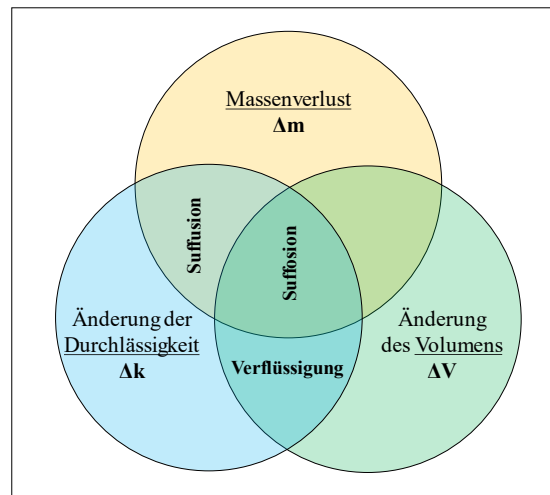
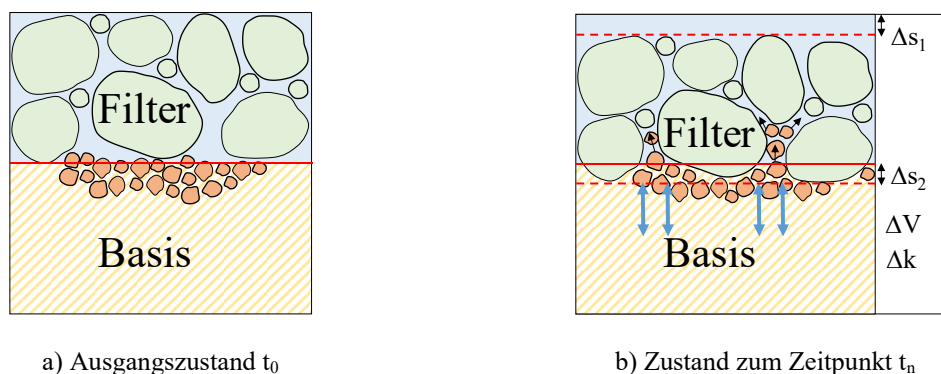


Abb. 2.3: Erosionsprozesse und deren Auswirkungen (modifiziert nach Fannin und Slangen (2014))

In dieser Studie werden folgende Erosions- und Transportprozesse näher betrachtet und sind dazu wie folgt definiert (Fannin und Slangen, 2014):

- Kontakterosion (Abbildung 2.4),
- Suffusion, Suffusion (Abbildung 2.5 und Abbildung 2.6),
- Fluidisierung, Verflüssigung (Abbildung 2.7 a) und Abbildung 2.7 b)).

Kontakterosion: In Abbildung 2.4 ist der Prozess der Kontakterosion zwischen zwei horizontal geschichteten granularen Materialien schematisch dargestellt. Bei einem hydraulisch offenen Filter kann der feinere Anteil des Basismaterials in den Porenraum des Filters infiltrieren. In Abhängigkeit der hydraulischen Einwirkung werden dabei auch Anteile der tragenden Bodenmatrix des Basismaterials erodiert. Die Kontakterosion führt damit zur Volumenabnahme der Basisschicht (ΔV), zur Verlagerung und Auflockerung der Schichtgrenze sowie zum Eintrag des Filtermaterials durch Einsinken in die Basisschicht. In der Filterschicht ergibt sich durch die Infiltration des Basismaterials eine Massenzunahme sowie eine Abnahme der Porosität und der Durchlässigkeit (Δk). Wird die tragende Bodenmatrix der Basis transportiert, handelt es sich um Kontakterosion, während der Transport des nichttragenden Anteils des Basismaterials als Kontaktsuffusion bezeichnet wird (Ziems, 1968; Kenney und Lau, 1985).



a) Ausgangszustand t_0

b) Zustand zum Zeitpunkt t_n

Abb. 2.4: Kontakterosion zwischen Basis- und Filterschicht unter oszillierender Strömung (ΔV , Δk)

Suffosion: Eine Folge der Kontakterosion kann auch die innere Erosion des infiltrierten Basismaterials im Filter sein. Auch feine Fraktionen des Filtermaterials können durch hydraulische Einwirkung im Porenraum des Filters durch Suffosion transportiert werden. In Abbildung 2.5 ist die Suffosion als Prozess der inneren Erosion der nichttragenden Kornfraktion schematisch dargestellt. Durch den Austrag des feineren Materials wird die Masse um Δm reduziert, sodass die Porosität zunimmt. Durch den größeren Fließquerschnitt im Porenraum (Porosität) erhöht sich damit auch die Durchlässigkeit um Δk . Dabei ergeben sich keine Änderungen des Volumens, da nur Material im Porenraum transportiert wird (Ziems, 1968; Kenney und Lau, 1985; Busch et al., 1993).

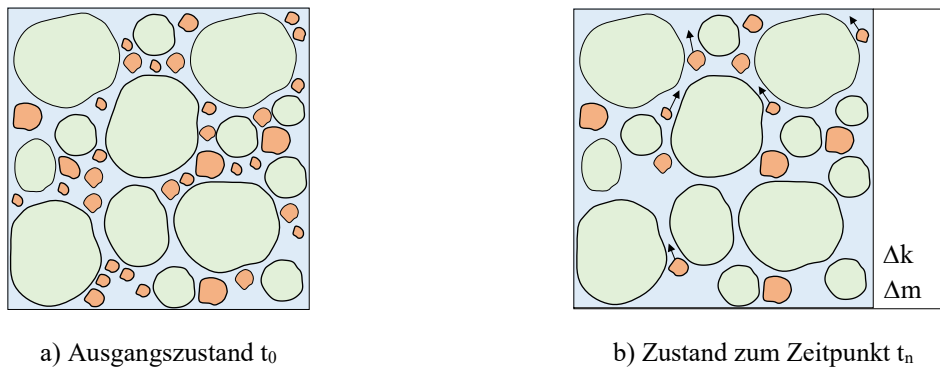


Abb. 2.5: Suffosion: Materialtransport der nichttragenden Kornfraktion im Porenraum (Δk , Δm)

Suffusion: Im Gegensatz zur Suffosion, die auf den Transport der nichttragenden feinen Kornfraktionen im Porenraum beschränkt ist, schließt Suffusion den Transport von tragenden Kornfraktionen ein. Dies kann zu Materialverlust (Δm) sowie zur Verformung der Bodenmatrix und damit zur Reduzierung des Volumens (ΔV) führen. Weiterhin können die Porosität und die Durchlässigkeit (Δk) durch Ausspülen des Porenraums zunehmen und durch eine darauffolgende Verdichtung abnehmen (Ziems, 1968). In Abbildung 2.6 ist der Prozess der Suffusion mit Massenverlust und Volumenreduzierung schematisch dargestellt.

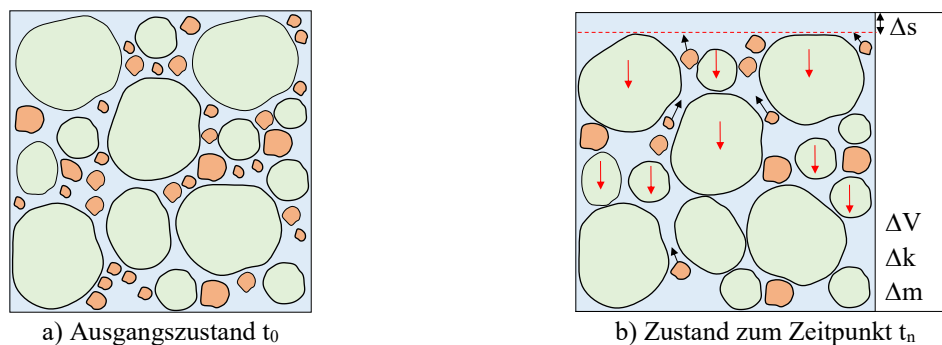


Abb. 2.6: Suffusion: Materialtransport im Porenraum einschließlich der tragenden Kornfraktionen (ΔV , Δk , Δm)

Verflüssigung: Bei der Verflüssigung (Abbildung 2.7 a)) dehnt sich durch den ansteigenden Porenwasserdruck die Bodenmatrix aus (Volumenausdehnung ΔV), verliert im kritischen Zustand die Eigenschaft als feste Bodenstruktur und verhält sich dabei wie eine viskose Flüssigkeit. Die Verflüssigung kann weiterhin zu einer Verdichtung der Bodenmatrix (Volumenreduzierung ΔV) führen (Abbildung 2.7 b)) (Ziems, 1968).

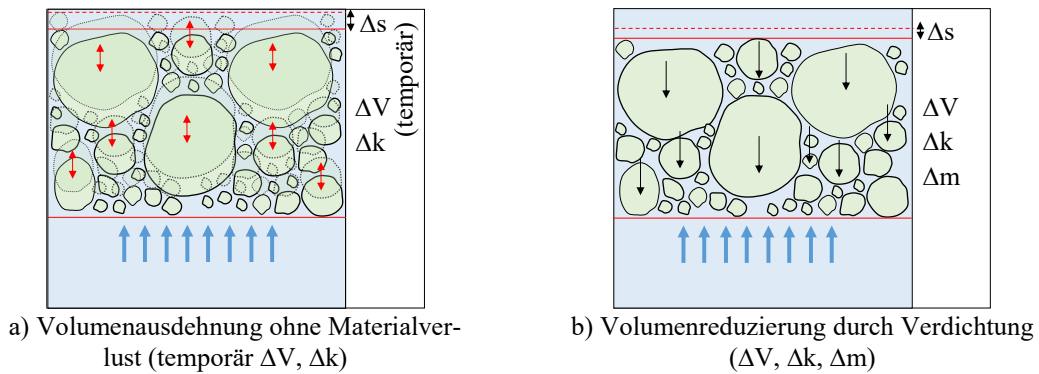


Abb. 2.7: Prozess der Verflüssigung mit a) Volumenausdehnung und b) Volumenreduzierung

Verflüssigung kann damit zur Volumenausdehnung sowie Zunahme der Durchlässigkeit (Δk) ohne Materialverlust und zu einer Reduzierung der Masse (Δm) des Volumens der Basis (ΔV) und der Durchlässigkeit im Filter (Δk) führen (Lowe, 1976; Foda et al., 1997).

Die hydraulischen Prozesse, die als Einwirkung in einer marinen Umgebung die geohydraulischen Prozesse beeinflussen und hervorrufen, werden in Abschnitt 2.2.1 detailliert beschrieben. Weiterhin wird der Zusammenhang zwischen den Spannungen im Porenraum und den Verformungen der Bodenmatrix in Abschnitt 2.2.2 hergestellt.

Die geohydraulischen Prozesse können nach Massenänderung, Volumenänderung und Änderung der Durchlässigkeit eingeteilt werden. Häufig treten diese Prozesse zusammen auf und sind stark voneinander abhängig. Zum Beispiel kann eine Volumenabnahme als eine Folge der Verflüssigung, Kontakterosion oder (Kontakt-) Suffusion entstehen. Da Kontaktsuffusion bei weitgestuften Basismaterialien auftritt, wird im Weiteren die Kontakterosion betrachtet. Eine temporäre Zunahme des Volumens wird durch Verflüssigung erreicht, wenn der Porenwasserdruck das Eigengewicht der Bodenmatrix überschreitet. Massenänderungen werden bei Suffusion (Austrag von feinem Material ohne Volumenänderung) und bei Suffusion (Austrag von feinem Material mit Volumenänderung) erreicht. Im Laborexperiment können diese Prozesse durch Messung der Setzung an der Oberkante der Probe sowie visuell beobachtet werden. Um die Prozesse genauer differenzieren zu können, ist es zusätzlich erforderlich, die Kornverteilung des Basis- und Filtermaterials schichtweise zu untersuchen.

2.1.3 Stabilitätskonzepte und Filterkriterien

Neben der geotechnischen Stabilität von Kornfiltern in Deckwerken mit den Nachweisen zum Abheben, Abgleiten und zur globalen Standsicherheit, sind Kornfilter auf die angrenzenden Schichten des Deckwerkaufbaus gegen Kontakterosion zu dimensionieren. Ebenfalls sind Kriterien zur inneren Stabilität des Filters sowie eine ausreichende Durchlässigkeit zur Entwässerung zu berücksichtigen (MAK, 2013). Die Stabilität von Kornfiltern in Bezug auf Kontakterosion lässt sich in drei Stabilitätskonzepte einteilen: (i) geometrische, (ii) hydraulische und (iii) dynamische Filterstabilität. Die Bemessungskonzepte können in Bezug auf die tolerierbare Materialumlagerung mit statischer, semi-statischer oder dynamischer Stabilität definiert werden (CUR161, 1993).

2.1.4 Geometrische Filterstabilität und geometrische Filterkriterien

Geometrische Kriterien beziehen sich auf charakteristische Korngrößen und werden angewendet, um (i) die Stabilität gegenüber Kontakterosion, (ii) die Durchlässigkeit und (iii) die interne Stabilität von Korn-

filtern zu beschreiben. Die geometrische Filterstabilität wird erreicht, wenn die Korngröße des Basismaterials kleiner als der Porendurchmesser d_p des Filtermaterials ist, sodass dieser Porenraum nicht durchwandert werden kann. In Bezug auf den Durchmesser kugelförmiger Filterkörner d_F ergibt sich der Porendurchmesser d_p bei dichtester Lagerung zu (Ziems, 1968):

$$d_p = 2 \cdot (\sqrt{3} - 1)^{-1} \cdot d_F = 0,155 \cdot d_F \quad (2.1)$$

und bei lockerster Lagerung zu:

$$d_p = (\sqrt{2} - 1) \cdot d_F = 0,414 \cdot d_F \quad (2.2)$$

Erste Untersuchungen wurden von Prinz, 1923 mit Kugeln gleicher Größe durchgeführt wobei die Porosität n sich zu $n = 0,26$ bei dichtester und $n = 0,48$ bei lockerster Lagerung ergibt. Diese stark idealisierte Betrachtung berücksichtigt nicht die Kornform und Kornverteilung, sodass die Porosität n und der Porendurchmesser d_p in der Natur stark variieren. Bezogen auf natürliche Sande verdeutlichen Beyer und Schweiger (1969) den Einfluss der Lagerungsdichte und der Ungleichförmigkeit auf die Porosität n (Abbildung 2.8).

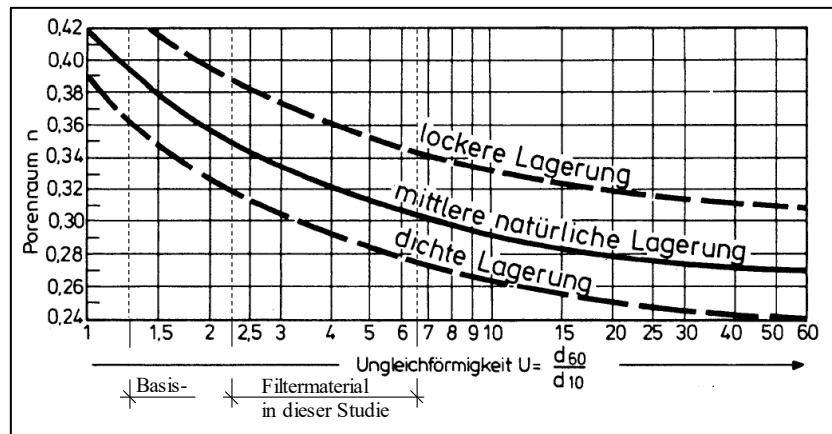


Abb. 2.8: Einfluss der Ungleichförmigkeit U und der Lagerungsdichte auf die Porosität n (modifiziert nach Beyer und Schweiger (1969) aus Langguth und Voigt (2004))

Nach Beyer und Schweiger, 1969 liegt der Unterschied der Porosität n zwischen dichtester und lockerster Lagerung in der Größenordnung von $\Delta n_F = 10\%$ bis 15% und bei Wassersättigung $\Delta n_F = 6\%$ bis 10% (Chapuis, 2012; Langguth und Voigt, 2004). Die Kenntnis über die Lagerungsdichte und Porosität ist entscheidend für die Bestimmung des hydraulischen Fließwiderstands in porösen Medien. Eine exakte Bestimmung dieser Größen mit einer ungestörten Probe ist häufig nicht möglich, aber eine Abschätzung der Porosität kann anhand der Ungleichförmigkeit und der Lagerungsdichte erfolgen (Abbildung 2.8). Weitere Ansätze zur Ermittlung der Porosität werden ausführlich in Chapuis (2012) diskutiert.

Abstandsverhältnis (d_{15F}/d_{85B}): Mit der Betrachtung des Porendurchmessers wurde nach Terzaghi das Abstandsverhältnis zwischen dem charakteristischen Filterkorndurchmesser d_{15F} (bei 15% Massendurchgang in m) und dem charakteristischen Durchmesser des Basismaterials d_{85B} (bei 85% Massendurchgang in m) für enggestuftes Basis- und Filtermaterial ($U_F; U_B < 2$) untersucht. In weiteren Untersuchungen nach Bertram (1940) wurde folgende Gleichung abgeleitet (Terzaghi, 1943; Terzaghi und Peck, 1961):

$$\frac{d_{15F}}{d_{85B}} < 4 \quad (2.3)$$

Dieses Filterkriterium wurde für horizontale Anordnungen von Basis und Filter unter gleichgerichteter Strömung in Richtung der Schwerkraft ($i \leq 8$) entwickelt. Das Filterkriterium selbst beinhaltet nur noch die charakteristischen Größen für die tragende Bodenmatrix des Basismaterials d_{85B} und den charakteristischen Porendurchmesser des Filters d_{15F} . In vielen Untersuchungen wurde bestätigt, dass der Korndurchmesser des Filters bei 15 % Massendurchgang den Porenraum und der Korndurchmesser des Basismaterials bei 85 % die Bodenmatrix repräsentieren (Honjo und Veneziano, 1989). Die tatsächliche hydraulische Belastung bleibt jedoch in der Anwendung geometrischer Kriterien häufig unberücksichtigt.

Ungleichförmigkeit und innere Stabilität: Aufbauend auf die Untersuchungen von Terzaghi wurde nach Cistin (1967) und Ziems (1968) die Filterstabilität für größere Ungleichförmigkeit ($U_F \leq 18$) ergänzt sowie nach Lafleur (1984) unter zusätzlicher Berücksichtigung der inneren Stabilität von weit gestuften und interemittierend gestuften Filtern weiterentwickelt (Lafleur et al., 1989). Hierbei wurden die Untersuchungen zur inneren Stabilität nach Sherard et al. (1984) und Kenney und Lau (1985) einbezogen (MMB, 2013). Der Zusammenhang zwischen dem Porendurchmesser und dem Korndurchmesser aus den Gleichungen 2.1 und 2.2 wird nach Kenney und Lau (1985) verwendet, um die Stabilität der einzelnen Kornfraktionen gegenüber innerer Erosion zu bewerten. Hierbei wird eine Massenfraction H_M zwischen einem Korndurchmesser d und dem vierfachen des Durchmessers d mit der angrenzenden feineren Fraktion F verglichen. Es entsteht innere Erosion einer Fraktion F , wenn $F > H_M$ ist. Wenn die Fraktion H_M im Bereich d bis $4 \cdot d$ ausreichend groß ist, wird kein Material der Fraktion F im Porenraum transportiert und das Material wird als nicht suffosiv beziehungsweise suffosionsstabil eingestuft (Kenney und Lau, 1985). Ein Überblick der wichtigsten geometrischen Filterkriterien ist in Schuler und Brauns (1993) und MMB (2013) gegeben.

Hydraulische Filterwirksamkeit: Aus der hydraulischen Filterwirksamkeit ergibt sich die Anforderung einer ausreichenden Durchlässigkeit des Filters im Verhältnis zur Durchlässigkeit des Basismaterials, um den Abbau des Porenwasserdrucks zu gewährleisten. Dabei ist nach Terzaghi und Peck (1961) folgendes Verhältnis des Korndurchmessers d_{15F} des Filtermaterials zum Korndurchmesser d_{15B} des Basismaterials (bei jeweils 15 % Massendurchgang) erforderlich:

$$\frac{d_{15F}}{d_{15B}} > 4 \quad (2.4)$$

In Tabelle 2.1 ist eine Auswahl der in der Baupraxis relevanten Filterkriterien mit den Gültigkeitsgrenzen und Randbedingungen der Untersuchungen dargestellt. Weitere Zusammenfassungen geometrischer Filterkriterien können Lafleur (1984), Heibaum (2004) und MMB (2013) entnommen werden.

Tab. 2.1: Ausgewählte geometrische Filterkriterien mit Randbedingungen der Untersuchungen

Autor	Filterkriterium	Randbedingungen und Gültigkeit
Prinz (1923)	$\frac{d_{50F}}{d_{50B}} \leq 4,42$	Gleichgerichtete Strömung, gleichförmiges Material, $U \approx 1$
Terzaghi (1943)	$\frac{d_{15F}}{d_{85B}} \leq 4$	Gleichgerichtete, schichtorthogonale Strömung, $U \leq 2$
Cistin (1967) Ziems (1968)	$\frac{d_{50F}}{d_{50B}} \leq f(U_F; U_B)$	Gleichgerichtete, schichtorthogonale Strömung ($U_B \leq 20$; $U_F \leq 18$)
de Graauw et al. (1983)	$\frac{d_{50F}}{d_{50B}} \leq 3$	Oszillierende, schichtorthogonale Strömung
SPM (1984) CEM (2008)	$\frac{d_{15F}}{d_{85B}} \leq 4 - 5$	Zur Anwendung im Küsteningenieurwesen basierend auf dem Ansatz nach Terzaghi, 1943
CIRIA/CUR/CETMEF (2008)	$\frac{d_{50F}}{d_{50B}} \leq 2,2 - 2,5$	Anwendung für Abstandsverhältnis zwischen Deckwerk und Unterlage

Die Übertragung von geometrischen Filterkriterien, die unter gleichgerichteter Strömung entwickelt wurden, auf oszillierende Strömungsbedingungen in marinen Bauwerken kann unter Umständen zu einem geometrisch offenen Filter führen. Einige Kriterien sind in einem sehr begrenzten Bereich der Ungleichförmigkeit von Basis- und Filtermaterial gültig. Die Stabilität weitgestufter Kornfilter, welche nach geometrischen Kriterien bemessen werden, ist bisher unter oszillierender Strömung nicht ausreichend untersucht worden. Aus den Untersuchungen von de Graauw et al. (1983) ist zu erwarten, dass die Anwendung üblicher geometrischer Kriterien zu einer wesentlich geringeren Filterstabilität unter oszillierender Strömung führen.

Die geometrischen Kriterien können ebenfalls zur Beschreibung der internen Stabilität gegenüber Suffusion angewendet werden. Die interne Stabilität des Filters ist nach Kenney und Lau (1985) gegeben, wenn in allen Abschnitten der Kornverteilung der jeweils feinere Anteil den Porenraum des größeren Anteils nicht passieren kann. Hierbei beziehen sich Kenney und Lau (1985) auf den Massendurchgang des größeren Materials beim vierfachen Korndurchmesser ($4 \cdot d_F$). Je größer der Anteil der Massenfraktion H_M , desto steiler verläuft die Siebkurve und ein konstanter Verlauf des Parameters H_M ergibt sich unter gerade verlaufenden Siebkurven (Kenney und Lau, 1985).

Geometrische Filterkriterien werden häufig fälschlicherweise mit geometrischer Filterstabilität gleichgesetzt. Da die empirisch ermittelten Abstandsverhältnisse jedoch nicht die tatsächliche Porengeometrie mit Porendurchmesser, Verknüpfungen und Verwindung der Porenkanäle berücksichtigen, wird unter Umständen kein geometrisch geschlossener Filter erreicht. Ein weiterer Aspekt ist, dass trotz anfänglicher geometrischer Filterstabilität der Porendurchmesser des Filters durch innere Erosion (Suffusion) zunehmen kann und somit kein geometrisch geschlossener Filter vorliegt. Bei weitgestuftem Basis- und Filtermaterial ($U > 2$) kann unter Anwendung geometrischer Filterkriterien nach Terzaghi ein geometrisch offener Filter entstehen. In diesem Fall sind hydraulische Filterkriterien anzuwenden. Die Übertragung von geometrischen Filterkriterien aus dem Dammbau auf den Einsatz in Sohlsicherungen unter welleninduzierter Strömung unterliegt großen Unsicherheiten aufgrund des dynamischen Verhaltens des Basis- und Filtermaterials sowie der Vernachlässigung der hydraulischen Bedingungen im Filteraufbau.

2.1.5 Hydraulische Filterstabilität und hydraulische Filterkriterien

Im Gegensatz zu geometrisch geschlossenen Filtern kann bei geometrisch offenen Filtern das feinere Basismaterial in den Porenraum infiltrieren, wenn die hydraulische Einwirkung einen kritischen Wert überschreitet. Die Hauptrichtung der Strömung kann schichtparallel und schichtorthogonal sowie weiterhin horizontal und senkrecht sein. Entscheidend für die Kontakterosion zwischen Meeresgrund und Filtermaterial in einer Sohlsicherung ist die schichtorthogonale Strömungskomponente.

Strömungsregime: Zur Beschreibung der hydraulischen Filterstabilität ist es sinnvoll, neben der Strömungsrichtung auch das Strömungsregime zu beschreiben. Es können stationäre Strömungsverhältnisse, stationäre gleichgerichtete Strömungen ($\partial u/\partial t = 0$) und instationäre Strömungsverhältnisse (zeitlich veränderliche, oszillierende, fluktuierende Strömungen ($\partial u/\partial t \neq 0$)) vorliegen. Das Strömungsregime kann weiterhin in laminare und turbulente Strömungen durch das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften unterschieden werden. Basierend auf den Untersuchungen von Reynolds (1894) wird der Fließzustand in porösen Medien üblicherweise auf einen charakteristischen Korndurchmesser d_c bezogen:

$$Re^* = \frac{\rho_w \cdot v_f \cdot d_c}{\eta_w} \quad (2.5)$$

mit:

- Re^* : kornbezogene Reynolds-Zahl
- ρ_w : Rohdichte des Fluids (Wasser) in kg/m^3
- v_f : querschnittsgemittelte Fließgeschwindigkeit (Filtergeschwindigkeit) in m/s
- d_c : charakteristischer Korndurchmesser in m
- η_w : dynamische Viskosität in $kg/(m \cdot s)$

Dybbs und Edwards (1984) haben mit Glaskugeln das Strömungsregime in porösen Medien untersucht und dabei die Fließzustände wie folgt unterschieden (Bear und Corapcioglu, 1984; Burcharth und Andersen, 1995; Pedras und Lemos, 2001):

- (i) *Darcy-Fließzustand*: Darcy- oder Kriechströmung, wobei die Strömung durch viskose Kräfte dominiert wird. $Re^* < 1$. Ab $Re^* = 1$ beginnt die Grenzschichtausbildung an den zum Porenraum angrenzenden Körnern.
- (ii) *Übergangsbereich*: ab dem Bereich von $1 < Re^* < 10$ herrscht ein Strömungsregime das durch Trägheitskräfte bestimmt wird. Die Hauptströmung im Porenraum findet außerhalb der Grenzschicht statt, wodurch sich ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen Gradient und Fließgeschwindigkeit einstellt. Dieser stationäre nichtlineare Fließzustand besteht bis zu einem Bereich von $10 \leq Re^* < \sim 150$.
- (iii) *Forchheimer-Fließzustand*: im Bereich von $150 < Re^* < 300$ wird ein instationärer laminarer Fließzustand erreicht.
- (iv) *Vollständig turbulenter Bereich*: im Bereich oberhalb von $Re^* > 300$ ist ein hochgradig instationärer Fließzustand erreicht.

Bewegungsbeginn: Der Bewegungsbeginn eines Einzelkorns an der Schichtgrenze zwischen Basis und Filter kann durch das Kräftegleichgewicht zwischen angreifenden Schub- und Beschleunigungskräften aus der Porenwasserströmung und dem Auftrieb sowie den haltenden Kräften aus Gewichtskraft und Reibungskräften beschrieben werden (Raudkivi, 1982). Die meisten Ansätze basieren auf dem Konzept nach Shields (1936) unter Betrachtung der kritischen Sohlschubspannung in Gerinneströmungen und durch die Übertragung auf eine kritische Filtergeschwindigkeit $v_{f,krit}$. Die Stabilität eines Einzelkorns kann ebenfalls mit der Bilanz aus der lokalen Fließgeschwindigkeit im Porenraum und der Sinkgeschwindigkeit beschrieben werden (Bear und Corapcioglu, 1984; Wörman, 1989).

Die Sinkgeschwindigkeit ist eine wichtige hydrodynamische Eigenschaft des Einzelkorns, da hiermit die maßgebenden Eigenschaften des Korns sowie des Fluids zusammengeführt werden. Die Sinkgeschwindigkeit bezieht sich auf die maximale Geschwindigkeit eines sinkenden Einzelkorns durch das Eigengewicht. Unter der Annahme stationärer Bedingungen des Wassers kann das Kräftegleichgewicht mit der Auftriebskraft F_A , der Gewichtskraft des Einzelkorns W und der Widerstandskraft des Fluids F_D beschrieben werden (Dean und Dalrymple, 2004). Die Sinkgeschwindigkeit w_s kann mit dem Ansatz nach Stokes in Abhängigkeit des Widerstandsbeiwertes c_D ermittelt werden. Der Widerstandsbeiwert des Einzelkorns c_D ist dabei abhängig von der Reynolds-Zahl Re . Die Sinkgeschwindigkeit w wird sowohl von der Kornrohichte und Kornform als auch vom Grad der Turbulenz, Beschleunigung des Fluids sowie durch andere Partikel im Fluid (Sedimentkonzentration) beeinflusst (Dean und Dalrymple, 1991).

Aus der Bilanz der wirkenden Kräfte kann ebenfalls der Grenzzustand der Stabilität einer ruhenden Kornfraktion aus mehreren Einzelkörnern abgeleitet werden. In diesem Zusammenhang wirken neben der Gewichtskraft auch Reibungskräfte sowie kohäsive Kräfte für feinere Kornfraktionen. Biologische und chemische Prozesse können ebenfalls zu einem größeren Widerstand der Kornfraktionen führen. Durch die Dynamik dieser Prozesse beziehen sich die meisten Ansätze auf die Beschreibung der kohäsionslosen Kornfraktionen. Die Summe der haltenden Kräfte gegenüber der Summe der mobilisierenden Kräfte des Fluids sind die Grundlage des empirischen Ansatzes nach Shields (1936) zur Beschreibung des Bewegungsbeginns einer Kornfraktion an der horizontalen Sohle. Die Fluideigenschaften sowie Eigenschaften der Kornfraktion, ausgedrückt durch den charakteristischen Korndurchmesser d_c , werden durch den (dimensionslosen) Shields-Parameter θ zusammengefasst:

$$\theta = \frac{\tau_{0,\max}}{\rho_w \cdot g \cdot (\rho_s / \rho_w - 1) \cdot d_c} \quad (2.6)$$

In Gleichung 2.6 des dimensionslosen Shields-Parameters θ ist die maximale Sohlschubspannung an der Sohle $\tau_{0,\max}$ [N/m²], die Rohdichte des Fluids ρ_w und des Einzelkorns ρ_s [kg/m³] sowie der charakteristische Korndurchmesser des Sohlmaterials d_c [m] berücksichtigt.

Das Shields-Konzept wurde von Madsen und Grant (1976) von der gleichgerichteten Strömung auf die oszillierende Strömung durch windinduzierte Wellen übertragen. Hierzu wurde die maximale Schubspannung in Abhängigkeit des Reibungsfaktors aus der Orbitalströmung verwendet. Ebenfalls auf der Grundlage des Shields-Konzeptes entwickelte Soulsby (1997) einen empirischen Ansatz unter Berücksichtigung gleichgerichteter und oszillierender Strömung sowie die Überlagerung dieser Strömungskomponenten und verwendete dazu den dimensionslosen Korndurchmesser D^* nach Ackers und White (1973) (van Rijn, 1984).

Das Kräftegleichgewicht zwischen widerstehenden und mobilisierenden Kräften dient zur Beschreibung des Bewegungsbeginns eines Einzelkorns oder einer Kornfraktion. Dabei bildet das Shields-Konzept der kritischen Schubspannung die wichtigste Grundlage für weitere darauf aufbauende Ansätze zur Ermittlung des Bewegungsbeginns unter gleichgerichteter und oszillierender Strömung sowie unter deren kombinierter Wirkung. Der Shields-Ansatz eignet sich durch die Erweiterung nach Soulsby (1997) zur Beschreibung des Bewegungsbeginns horizontal liegender Bodenschichten und beinhaltet implizit die Orbitalströmung und die Orbitalbeschleunigung. Hierdurch wird eine Beschreibung der Stabilität von Kornfiltern in Bezug auf äußere Erosion möglich. Die Übertragung auf innere Erosion sowie die Kontakterosion zwischen Kornfilter und Basisschicht bedarf weiterer Analysen der hydraulischen Prozesse in porösen Medien.

Untersuchungen zur Filterstabilität: Die wichtigsten Laborexperimente zur hydraulischen Filterstabilität unter Berücksichtigung schichtorthogonaler oszillierender Durchströmung sind mit den Materialeigenschaften und den hydraulischen Randbedingungen nachfolgend zusammengefasst.

Untersuchungen zu hydraulisch offenen Kornfiltern wurden von Ziems (1968) unter gleichgerichteter Strömung und von Belyashevskii et al. (1972) unter fluktuierender Strömung durchgeführt. Belyashevskii et al. (1972) untersuchten die Filterstabilität mit einer Druckdifferenz von bis zu 5,5 mWs bei einer relativ hohen Auflast im Bereich von ca. $p_A = 40 \text{ kN/m}^2$ bis 60 kN/m^2 . Dabei betrug die Frequenz der Anregung $1/T = 1$ bis 5 Hz bzw. $T = 0,2$ bis $1,0 \text{ s}$. Diese hydraulische Belastung bezieht sich jedoch auf turbulente Druckschwankungen mit relativ hoher Frequenz im Vergleich zu windinduzierten oszillierenden Strömungen. Molenkamp et al. (1979) untersuchten die oszillierende Strömung mit gleichgerichteter Strömung (in Richtung der Gravitation) überlagert. Hierbei war die Probe mit einer sehr hohen Auflast ($p_A = 137 \text{ kN/m}^2$) verspannt, wobei der Einfluss der Auflast nicht explizit untersucht wurde.

Wichtige Erkenntnisse zum Unterschied zwischen gleichgerichteter und oszillierender Strömung ergeben sich aus den Laborexperimenten von van der Meulen (1983) und de Graauw et al. (1983). Hierbei wurde erstmalig detailliert aufgezeigt, dass eine geringere Stabilität unter oszillierender Strömung gegenüber gleichgerichteter Strömung durch die fehlende Brückenbildung des Basismaterials im Porenraum des Filters erreicht wird. Bezuijen et al. (1987) untersuchten gleichzeitig schichtorthogonale und schichtparallele oszillierende Strömungen an geneigten Böschungssicherungen unterhalb einer Deckschicht. Hieraus entstanden eine Bemessungsformel und ein Bemessungsdiagramm zur Ermittlung des kritischen hydraulischen Gradienten in Abhängigkeit charakteristischer Korndurchmesser, Porosität und Böschungsneigung. Die oszillierende Strömung wurde in einem geschlossenen Wassertunnel mit einer Periode von 2 Sekunden untersucht, dabei wurden keine Unterschiede in der kritischen Filtergeschwindigkeit zur gleichgerichteten Strömung festgestellt.

Köhler (1993), Köhler et al. (1999) und Köhler et al. (2004) untersuchten den Prozess des Absunks durch Schiffswellen in einer Triaxialzelle bei geringen Druckhöhen. Hieraus entstanden wichtige Grundlagen für die Versuchsdurchführung mit der Wechseldurchströmungsanlage. Des Weiteren wurde der Einfluss des Gasanteils im Porenraum untersucht. Der Einfluss der Auflast und der Spannungen im Korngerüst auf die Filterstabilität wurden dabei nicht explizit untersucht.

Bakker et al. (1994) und Adel et al. (1994) untersuchten die kritische Filtergeschwindigkeit auf der Grundlage des Shields-Ansatzes in einem horizontal geschichteten Filteraufbau und als Erweiterung der Untersuchungen nach Bezuijen et al. (1987) mit größerem Basismaterial. Hierbei wurden Stabilitätskriterien für die gleichgerichtete schichtparallele Strömung und später auch für die oszillierende Strömung entwickelt. Die Schichtdicke nach Wörman (1989) wurde in den weiteren theoretischen Untersuchungen nach Bakker et al. (1994) mit einem Verhältnis zwischen Deckschichtmaterial und Abstandsverhältnis des Filters einbezogen.

Weitere Untersuchungen wurden auf der Grundlage des Bemessungsdiagramms nach Klein Breteler et al. (1992) von Wolters und van Gent (2012), van de Sande et al. (2015) und van Gent und Wolters (2015) für hydraulisch offene Kornfilter auf geneigten Böschungen unter der Einwirkung von Wellen durchgeführt. Dazu wurde der kritische hydraulische Gradient basierend auf der Forchheimer-Gleichung in Abhängigkeit der Forchheimer-Koeffizienten nach Klein Breteler et al. (1992) verwendet. Die kritische Filtergeschwindigkeit wurde für verschiedene Basismaterialien in Abhängigkeit von Porosität, Korndurchmesser des Filters d_{15F} , Korndichte (unter Auftrieb) sowie Böschungsneigung ermittelt. In diesen Untersuchungen wurde der schichtparallele hydraulische Gradient gegenüber dem schichtorthogonalen hydraulischen Gradienten als maßgebende Größe für die Kontakterosion verwendet (van Gent und Wolters, 2015).

Eine Übersicht der hydraulischen Filterkriterien ist mit der untersuchten Strömungskomponente in Tabelle 2.2 (in chronologischer Reihenfolge) dargestellt.

Tab. 2.2: Ausgewählte hydraulische Filterkriterien mit den untersuchten Strömungskomponenten

Autor	Stabilitätsansatz	Untersuchte Strömungskomponente
Davidenkoff (1967)	$i_{\text{krit}} = f(A_{50})$	Gleichgerichtete, schichtorthogonale Strömung
Ziems (1968)	$i_{\text{krit}} = f(d_{10F}; A_{50})$	<i>Gleichgerichtete, schichtorthogonale Strömung</i>
de Graauw et al. (1983)	$i_{\text{krit}} = f(v_{f,\text{krit}}; n_F; d_{15F}; d_{50B})$	<i>Gleichgerichtete und oszillierende schichtorthogonale Strömung</i>
Bezuijen et al. (1987)	$u_{\text{krit}} = f(n_F; \theta; \rho'; d_{50B})$	Strömung in Böschungssicherung (gleichgerichtet und oszillierend, schichtparallel/geneigt)
Wörman (1989)	$S = f(\rho'; n_F; d_{15F}; d_{85B})^{1)}$	Gleichgerichtete, horizontale, schichtparallele Strömung
Adel et al. (1994); Bakker et al. (1994)	$A = f(R; d_{50F}; d_{50B})$	Gleichgerichtete, horizontale (turbulente) Strömung in Sohlsicherung
Sumer und Fredsøe (2002)	$\theta_{\text{krit}} = f(d_{50B}; SD_F)$	Schichtparallele Strömung in einer Sohlsicherung
Hoffmans et al. (2008), Verheij et al. (2012), Hoffmans, Gijs J. C. M (2012)	$S = f(d_{15F}; d_{50F}; d_{50B})$ $u_{f,c} = f(n_F; d_{15F}; d_{50B}; \theta; \rho')$	Strömung in einer Sohlsicherung
Wolters und van Gent (2012)	$i_{\text{krit}} = f(n_F; d_{15F}; d_{50B}; u_{\text{krit}}^*)$	Gleichgerichtete und oszillierende Strömung schichtparallel in horizontaler Filterschicht

¹⁾ geometrisches Stabilitätskriterium basierend auf hydraulischem Ansatz

- i_{krit} : kritischer hydraulischer Gradient
 $v_{f,\text{krit}}$: kritische Filtergeschwindigkeit in m/s
 $u_{f,\text{krit}}$: kritische Fließgeschwindigkeit in m/s
 u_{krit}^* : kritische Schubspannungsgeschwindigkeit des Basismaterials in m/s
 SD_F : Schichtdicke des Filters in m
 A : Abstandsverhältnis zwischen charakteristischen Korndurchmessern des Basis- und Filtermaterials
 θ : Shields-Parameter
 R : hydraulischer Radius in m
 U : Ungleichförmigkeit
 d_x : charakteristische Korndurchmesser bei x % Massendurchgang des Filters (F) bzw. der Basis (B) in m
 ρ' : Auftriebsdichte in kg/m³

Die ausgewählten hydraulischen Ansätze zur Filterstabilität in Tabelle 2.2 zeigen die unterschiedlichen Konzepte in Bezug auf kritische hydraulische Parameter (i_{krit} , u_{krit}), geometrische Größen (S , A) und Shields-Parameter (θ). Einige Ansätze wurden auf hydraulischer Grundlage hergeleitet, obwohl sie lediglich geometrische Kriterien ohne explizite Berücksichtigung der hydraulischen Belastung beinhalten (Tabelle 2.2). Die meisten Ansätze berücksichtigen die horizontale Strömung in einer horizontalen Schichtung zweier poröser Medien, jedoch liegen nur wenige Untersuchungen zur Beschreibung der vertikalen Strömungskomponente durch den Porenwasserdruck vor. Die beiden wichtigsten Ansätze zur Ermittlung des kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} unter schichtorthogonaler Strömung sind:

- *de Graauw et al. (1983)*: vertikale Strömung unter gleichgerichteter und oszillierender Strömung (Abbildung 2.9)
- *Ziems (1968)*: vertikale Strömung unter gleichgerichteter Strömung (Gleichungen 2.8 und 2.7)

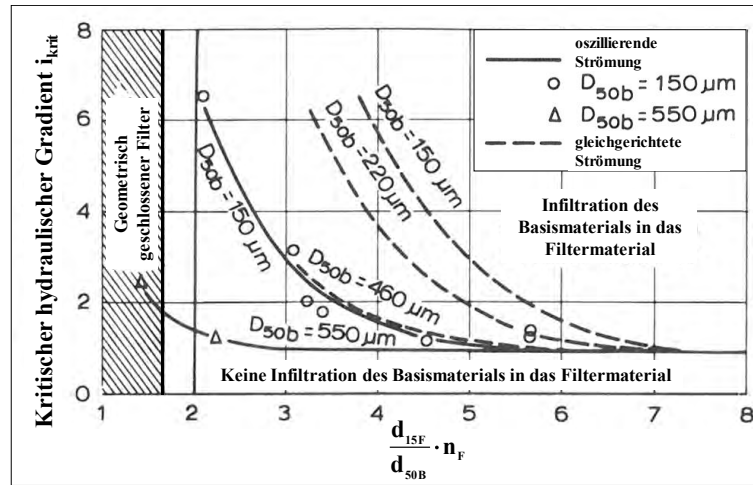


Abb. 2.9: Kritischer hydraulischer Gradient nach de Graauw et al. (1983) zu gleichgerichteter und oszillierender Strömung orthogonal zur Schichtgrenze (modifiziert nach de Graauw et al. (1983))

Gleichung 2.7 wurde zur Ermittlung des kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} nach Ziems (1968) mit dem Abstandsverhältnis der mittleren Korndurchmesser des Basis- und Filtermaterials d_{50B} und d_{50F} (bei 50 % Massendurchgang) hergeleitet.

$$i_{krit} = 1 + 1000 \cdot \left(\frac{d_{50F}}{d_{50B}} \right)^{-2} \quad (2.7)$$

In Gleichung 2.8 ist der nach Ziems (1968) vorgeschlagene Sicherheitsbeiwert $\eta = 1,5$ zur Berücksichtigung einer zusätzlichen Sicherheit durch Abminderung des kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} sowie der Korndurchmesser des Basismaterials d_{10B} (bei 10 % Massendurchgang) berücksichtigt. Das Abstandsverhältnis wurde mit dem Korndurchmesser d_{50} für gleichförmige Basis- und Filtermaterialien hergeleitet und berücksichtigt die Durchlässigkeit des Basismaterials mit dem Ansatz nach Hazen mit dem Korndurchmesser d_{10B} .

$$i_{krit} = 0,66 + \frac{6}{d_{10B}^2} \cdot \left(\frac{d_{50F}}{d_{50B}} \right)^{-2} \quad (2.8)$$

Weiterhin basieren die bisherigen Ansätze auf dem statischen Ansatz des Bewegungsbeginns, wobei das dynamische Verhalten und der Selbstheilungsprozess unberücksichtigt bleiben. Dynamische Filterkriterien stellen hierbei eine besondere Form der hydraulischen Filterkriterien mit zusätzlichem Maß

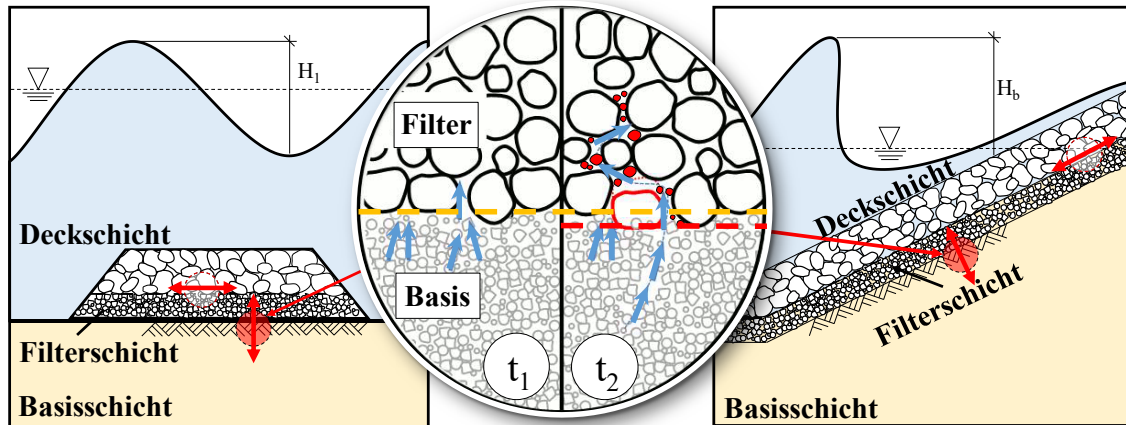
einer zulässigen Materialumlagerung dar. Durch die dynamische Veränderung des Korngefüges im Filter, ausgelöst durch Kontakterosion und Infiltration, wird versucht einen Gleichgewichtszustand und somit eine dynamische Stabilität des Filters zu erreichen. Aufgrund der Komplexität der geohydraulischen Prozesse liegen hierzu bislang nur erste Ansätze vor, aber noch keine zuverlässigen dynamischen Filterkriterien (CUR161, 1993).

Hydraulische Filterkriterien unterscheiden sich durch Strömungsrichtung und Strömungsregime. Aussagen über die Filterstabilität können daher nur zu den jeweils untersuchten hydraulischen Bedingungen getroffen werden. Die Hauptkomponenten der Strömung können in schichtparallel und schichtorthogonal sowie weiter in horizontal, vertikal und geneigt unterschieden werden. Obgleich für schichtparallele Strömungen bereits wichtige Grundlagen vorliegen, bestehen weiterhin relevante Wissenslücken zu schichtorthogonaler Strömung in horizontalen Filterlagen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bisher keine Kriterien für welleninduzierte schichtorthogonale Strömungen zu extremen Wellenbedingungen in Wassertiefen bis 45 m, wie sie im Küsten- und Offshore-Bereich erwartet werden, vorliegen. Der Einfluss der Auflast bzw. der Schichtdicke wurde im Ansatz nach Wörman (1989) einbezogen, es fehlen jedoch systematische Untersuchungen zur Kontakterosion unter dem Einfluss oszillierender Strömung und geringer Filterauflast. Die Anwendung der hydraulischen und dynamischen Filterkriterien in der Baupraxis ist bisher durch den fehlenden Zusammenhang zwischen Wellenparametern und dem (kritischen) hydraulischen Gradienten nicht möglich. Die alternative Anwendung geometrischer Kriterien aus dem Dammbau für Filter unter welleninduzierter Strömung kann bei großen Wellenhöhen mit hoher Wellensteilheit zum Versagen des Filters und somit zum Bauwerksversagen führen. Außerhalb der Anwendungsgrenzen von geometrischen Kriterien führt die Anwendung zu geometrisch offenen Filtern, sodass sie in Abhängigkeit der hydraulischen Belastung instabil werden können.

2.2 Welleninduzierte Strömungen in porösen Medien

Die hydraulischen Einwirkungen eines Kornfilters können in gleichgerichtete und oszillierende sowie in stationäre und instationäre Strömungen unterschieden werden. Die hydrodynamischen Prozesse im Küsten- und Offshore-Bereich (Abschnitt 2.2.1) werden zusammen mit Wellentheorien und den zugehörigen Wellenparametern beschrieben. Die betrachteten Systeme und Geometrien einer Sohl- und Böschungssicherung sind in Abbildung 2.10 dargestellt.



a) Horizontale Sohl- und Böschungssicherung

b) Geneigte Böschungssicherung

Abb. 2.10: Systemskizze der Welleneinwirkung auf a) Sohl- und b) Böschungssicherung

Die Druckverteilung unter einer fortschreitenden Welle und die Interaktion mit dem Porenwasserdruck im porösen Medium sind dabei maßgebend für die Entwicklung des hydraulischen Gradienten (Abschnitt 2.2.1). Hierzu wird der Rückschluss von gemessenen Druckverläufen auf äquivalente Wellenparameter als wichtige Grundlage für hydraulische Laborexperimente erläutert. In Abschnitt 2.2.2 wird die Interaktion zwischen welleninduzierten Strömungen, Bauwerken und dem Untergrund beschrieben. Die Betrachtung unterschiedlicher Skalen wird im Zusammenhang mit der numerischen Modellierung dargestellt. Im letzten Abschnitt werden die hydraulischen Einwirkungen mit den Strömungsprozessen im Filter als poröses Medium zusammengefasst. Die Interaktion zwischen dem hydraulischen Gradienten des Porenwasserdrucks und der Filtergeschwindigkeit wird mit dem Strömungswiderstand in Abhängigkeit des Strömungsregimes in Abschnitt 2.2.3 beschrieben.

2.2.1 Welleninduzierte Strömungs- und Druckverteilung

Wellenbewegungen im marinen Bereich können in windinduzierte und schiffsinduzierte Wellen unterschieden werden. Im Folgenden wird Bezug auf die windinduzierte Einzelwelle auf der Grundlage der linearen Wellentheorie genommen (Dean und Dalrymple, 1991). Die fortschreitende Welle kann für kleine Amplituden auf ebener undurchlässiger Sohle mit der Bewegung der einzelnen Wasserpartikel und der Druckverteilung nach der linearen Wellentheorie beschrieben werden. Die Wellenauslenkung η der fortschreitenden Einzelwelle mit der Wellenhöhe H kann nach Gleichung 2.9 an der Position x zum Zeitpunkt t mit dem Phasenwinkel θ nach Gleichung 2.10 bestimmt werden (Dean und Dalrymple, 1991). Die wichtigsten Gleichungen der Wellenparameter sind in Tabelle 2.3 zusammengefasst.

Tab. 2.3: Übersicht der Wellenparameter nach Dean und Dalrymple, 1991

Beschreibung	Gleichung	Nr.
Wellenauslenkung η	$\eta = \frac{H}{2} \cdot \sin(\theta)$	(2.9)
Phasenwinkel θ	$\theta = \frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot x - \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t$	(2.10)
Wellenlänge L in der Wassertiefe h (Übergangsbereich) nach Fenton und McKee (1990)	$L = L_0 \cdot \left(\tanh \left(\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{L_0} \right)^{\frac{3}{4}} \right) \right)^{\frac{2}{3}}$	(2.11)
Wellenlänge im Tiefwasser	$L_0 = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi}$	(2.12)
η [m]	Wellenauslenkung	
g [m/s ²]	Erdbeschleunigung	
H [m]	Wellenhöhe	
h [m]	Wassertiefe	
θ [rad]	Phasenwinkel	
L [m]	Wellenlänge	
L_0 [m]	Wellenlänge im Tiefwasser	
x [m]	Horizontale Position	
T [s]	Wellenperiode	
t [s]	Zeitpunkt	

Die Wellenlänge L wird iterativ mit der Dispersionsgleichung ermittelt und kann mit guter Näherung nach Fenton und McKee (1990) explizit mit den Gleichungen 2.11 und Gleichung 2.12 ermittelt werden.

Das Maximum der Wellenauslenkung und damit auch der Wellenhöhe H wird bei der Grenzsteilheit H/L vor dem Brechen der Welle erreicht. Die maximale Wellensteilheit im Brechpunkt dient als Annahme zur Ermittlung der maßgebenden Wellenparameter nach folgender Gleichung nach Miche (1944) mit der Wellenhöhe H_b [m], der Wellenlänge L_b [m] und Wassertiefe h_b [m] im Brechpunkt:

$$\frac{H_b}{L_b} = 0,142 \cdot \tanh \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h_b}{L_b} \right) \quad (2.13)$$

Weiterhin beschreibt der Brechindex das Verhältnis von Wellenhöhe H zur Wassertiefe h (im englischen Sprachraum auch als d bezeichnet). Die Brechgrenze der Einzelwelle wird nach McCowan (1894) wie folgt beschrieben:

$$\frac{H}{h} \leq 0,78 \quad (2.14)$$

In Abbildung 2.11 ist das Brechverhalten von Wellen in Abhängigkeit des Verhältnisses von Wassertiefe und Wellenlänge sowie von Wellenhöhe und Wellenlänge dargestellt. Ausgehend von dem Maximum aus H/h und H/L ergibt sich die maximale Druckänderung pro Zeit an der Sohle. Durch die Abhängigkeit der Wellenhöhe von Wellenlänge und Wassertiefe ergeben sich unterschiedliche Bedingungen in drei Bereichen: (i) Tiefwasserbereich ($h/L > 0,5$), (ii) Übergangsbereich ($0,5 > h/L > 0,05$) und

(iii) Flachwasserbereich ($h/L < 0,05$). Weiterhin kann die gültige Wellentheorie über die Verhältnisse $H/(g \cdot T^2)$ und $h/(g \cdot T^2)$ nach Abbildung 2.11 ermittelt werden.

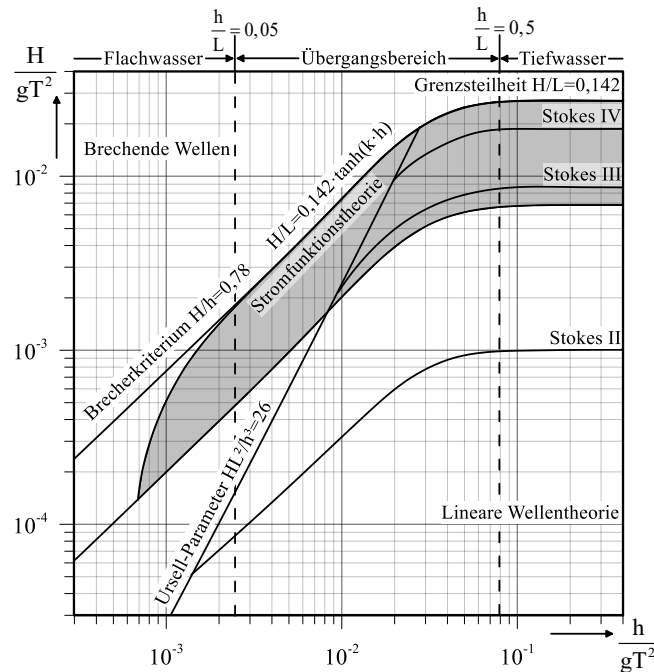


Abb. 2.11: Anwendungsbereiche der Wellentheorien (modifiziert nach SPM (1984))

Die lineare Wellentheorie nach Airy und Laplace ist die wichtigste Wellentheorie in der Ingenieurpraxis für eine näherungsweise Erfassung der Wellen- und Orbitalgeschwindigkeiten, Beschleunigungen und der Druckverteilung in Abhängigkeit der Wassertiefe. Die lineare Wellentheorie erreicht im Tiefwasserbereich ($h/L > 0,5$) eine relativ hohe Genauigkeit, die im Übergangsbereich bis zum Flachwasserbereich ($h/L < 0,05$) abnimmt. Mit abnehmender Wassertiefe h und zunehmender Wellenhöhe H wird bei gleicher Wellenlänge L die Anwendung Wellentheorien höherer Ordnung erforderlich. Die Vorteile der linearen Wellentheorie gegenüber Wellentheorien höherer Ordnung liegen in der vereinfachten Anwendung und dem geringen Rechenaufwand bei ausreichender Genauigkeit für die meisten Fragestellungen in der Baupraxis (Dean und Dalrymple, 1991).

In Bezug auf die Zielsetzung ist die vertikale Strömungskomponente w eine wichtige einwirkende Größe im Zusammenhang mit den in Abschnitt 2.1.5 beschriebenen Stabilitätskriterien. Hierbei ist festzustellen, dass im Flachwasser ($h/L < 0,05$) horizontale Strömungen an der Sohle vorherrschen und die Orbitalströmungen an der Sohle im Tiefwasser ($h/L > 0,5$) vernachlässigbar gering werden. Aufgrund der Annahme der undurchlässigen Sohle ist eine Anwendung der linearen Wellentheorie auf poröse Sohlen nicht zulässig (Dean und Dalrymple, 1991).

Ebenfalls ist die Druckverteilung unter der fortschreitenden Welle eine wichtige Größe zur Ermittlung des hydraulischen Gradienten im Meeresgrund sowie im darüber liegenden Filteraufbau. Die Druckverteilung kann nach linearer Wellentheorie mit dem hydrostatischen und hydrodynamischen Druckanteil nach Gleichung 2.15 ermittelt werden (Dean und Dalrymple, 1991). Bei einer durchlässigen Sohle besteht eine Interaktion zwischen Boden und Wellenbewegung. In dieser Studie wird daher nicht die Orbitalströmungskomponente w , sondern die vertikale Druckverteilung $p(z)$ unter Berücksichtigung der Durchlässigkeit des Basis- und Filtermaterials als Randbedingung angewendet. Der Einfluss der Wellendämpfung im porösen Sohlmaterial nimmt mit dem Wasserstand h ab, führt jedoch zu einer Abnahme der Wellenauslenkung η und zu einer Zunahme der Wellenlänge L (Dean und Dalrymple, 1991; Liu und

Dalrymple, 1984; Gu und Wang, 1991). Der Einfluss des Wellendrucks auf den Porenwasserdruck und die Porenwasserströmung wird hierzu in Abschnitt 2.2.2 beschrieben.

Die Druckverteilung unter fortschreitenden Wellen im Übergangsbereich zwischen Tiefwasser- und Flachwasser kann in Abhängigkeit der Tiefe z nach Gleichung 2.15 ermittelt werden (Dean und Dalrymple, 1991):

$$p = \rho_w \cdot g \cdot \left[\frac{H}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \frac{\cosh\left(\frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot (h + z)\right)}{\cosh\left(\frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot h\right)} - z \right] \quad (2.15)$$

H	[m]	Wellenhöhe
T	[s]	Wellenperiode
L	[m]	Wellenlänge
h	[m]	Wassertiefe
z	[m]	Tiefenlage unter Ruhewasserspiegel (an der Sohle wird $z = -h$)
θ	[rad]	Phasenwinkel nach Gleichung 2.10
p	[N/m ²]	Hydrostatischer und hydrodynamischer Druck
ρ_w	[kg/m ³]	Rohdichte des Wassers
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung

Die Ermittlung des Wellendrucks an der Sohle mit der linearen Wellentheorie liefert nach Zen und Yamazaki (1990) eine sinnvolle Näherungslösung. Durch die Annahme der undurchlässigen Sohle kann die lineare Wellentheorie jedoch nicht zur Ermittlung der vertikalen Strömungskomponente an der Sohle angewendet werden (Zen und Yamazaki, 1990).

Die lineare Wellentheorie ermöglicht eine einfache Beschreibung der Wellenauslenkung und der Wellendruckverteilung über die Wassertiefe. Zur Beschreibung der Strömung oberhalb poröser Sohlen eignet sich die lineare Wellentheorie nicht, da diese Theorie der Annahme einer undurchlässigen Sohle unterliegt. Für die Fragestellung dieser Studie wird daher die lineare Wellentheorie nur zur Definition der Druckrandbedingungen in experimentellen und numerischen Untersuchungen anstatt der vertikalen Strömungskomponente der Orbitalströmung verwendet. Dies bildet eine wichtige Grundlage für die Ermittlung der hydraulischen Einwirkung in der Meeressohle sowie in den darauf liegenden Filter- und Deckwerksaufbauten. Mit der Kenntnis der Druckverteilung wird die Beschreibung der Strömung und des Porenwasserdrucks im Meeresgrund ermöglicht (Abschnitt 2.2.2). Dies stellt wiederum die Grundlage für die Ermittlung der Stabilität des Basismaterials an der Schichtgrenze zu einem aufliegenden Filter dar. Um einen Zusammenhang zwischen Wellenparametern und der Stabilität von Kornfiltern unter vertikal oszillierender Strömung herzustellen, bedarf es weiterer Untersuchungen.

2.2.2 Welleninduzierter Porenwasserdruck, Konsolidierung und Verformung

Der welleninduzierte Porenwasserdruck sowie die daraus resultierende Strömung im Meeresgrund ist die Grundlage für die Bestimmung der hydraulischen Einwirkung eines Filters in einer Sohlsicherung im Küsten- und Offshore-Bereich. Die Strömung im Meeresgrund kann als Mehrphasenströmung (Wasser, Boden und Gas) betrachtet werden. Die maßgebende Eigenschaft dieser drei Phasen ist die Kompressibilität bzw. Steifigkeit (Groot et al., 2006). In der Betrachtung des Meeresbodens als Kontinuum entstehen durch die dynamischen Druckänderungen und Orbitalströmungen unter fortschreitenden Wellen Porenwasserströmungen sowie Porenwasserdrücke, wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben. Der hydrostatische und hydrodynamische Druckanteil einer Welle ist mit der Druckverteilung und den Porenwasserströmungen in Abbildung 2.12 skizziert.

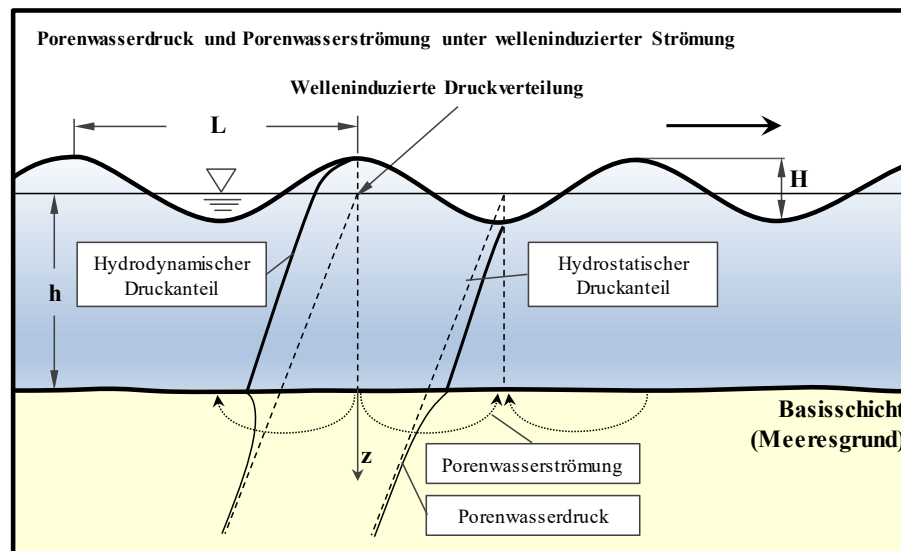


Abb. 2.12: Welleninduzierter Porenwasserdruck und -strömung unter fortschreitenden Wellen (modifiziert nach Sumer und Fredsøe, 2002 und Groot et al., 2006)

Durch den Gradienten des Porenwasserdrucks infolge des dynamischen Druckanteils der fortschreitenden Welle verlaufen Porenwasserströmungen im Meeresgrund parallel zur Wellenausbreitungsrichtung. Die oszillierenden Druckänderungen führen zu zyklischen Änderungen des Porenwasserdrucks im Meeresgrund sowie zur Interaktion von Bauwerken mit dem Meeresgrund durch Änderungen der effektiven Auflast und beeinflussen somit die bodendynamischen Prozesse (Jeng, 2003; Zen und Yamazaki, 1990).

Porenwasserüberdruck: Die wichtigsten Grundlagen zum Prozess der welleninduzierten residualen Porenwasserdrücke und effektiven Spannungen im Meeresboden sowie der Interaktion zwischen Wellen, Bauwerk und Untergrund werden von Rahman et al. (1977); Kvalstad (1998); Richwien und Perau (1997); Knoeff und Groot (1998); Jeng und Rahman (2000); Kudella et al. (2006); Jeng und Li (2007); Bubel und Grabe (2015) beschrieben. Die Entwicklung von Ansätzen und numerischen Modellen zur Interaktion zwischen Seegang und Meeresgrund sowie den Prozessen der Verflüssigung, Druckdämpfung, Hebung und Senkung durch vertikale Strömungskomponenten sind in Jeng (2003) zusammengefasst.

Durch die Orbitalströmungen und oszillierenden Druckänderungen unter einer fortschreitenden Welle ist der Porenwasserdruck im Untergrund räumlich und zeitlich veränderlich, wodurch Porenwasserüberdruck entstehen kann (Abbildung 2.13). Der Porenwasserüberdruck besteht aus dem transienten (nicht verzögerten) Porenwasserüberdruck u_t und dem residualen Porenwasserüberdruck u_r (Kudella et al., 2006):

Transienter Porenwasserüberdruck (Abbildung 2.13 b): Die sofortige Resonanz des Porenwasserüberdrucks unter der Einwirkung welleninduzierter Druckänderungen entsteht durch die Kompression des Porenwassers und der Bodenmatrix. Transiente Verflüssigung entsteht in der Regel in ungesättigten Böden zum Zeitpunkt des Wellentals durch welleninduzierte (oszillierende) Strömung (Kudella et al., 2006; Zhao et al., 2016).

Residualer Porenwasserüberdruck (Abbildung 2.13 c): Die schrittweise Änderung der Festigkeit und Steifigkeit des Bodens wird durch wiederholte Belastung oder Konsolidierung beeinflusst. Bei bindigen Böden führt dies häufig zu einem Verlust der Festigkeit und Steifigkeit (Zerfall) und bei nicht bindigen Böden führt dies hauptsächlich zu einem residualen Porenwasserdruck durch schrittweise Kontraktion, beeinflusst durch die Drainage.

Die Entwicklung des residualen Porenwasserdrucks unter einem Bauwerk wird insbesondere unter regelmäßigen Wellen durch die Lagerungsdichte und die Durchlässigkeit des Korngefüges beeinflusst (Kudella et al., 2006). Über die Dauer einer Wellenperiode nimmt der transiente Porenwasserdruck u_t bei positiver Wellenauslenkung zu und bei negativer Wellenauslenkung ab. Durch hohe Amplituden und hohe Frequenzen kann sich bei relativ geringer Durchlässigkeit des Bodens zusätzlich ein residualer Porenwasserdruck u_r entwickeln, der zur Bodenverflüssigung führen kann (Groot et al., 2006; Kudella et al., 2006).

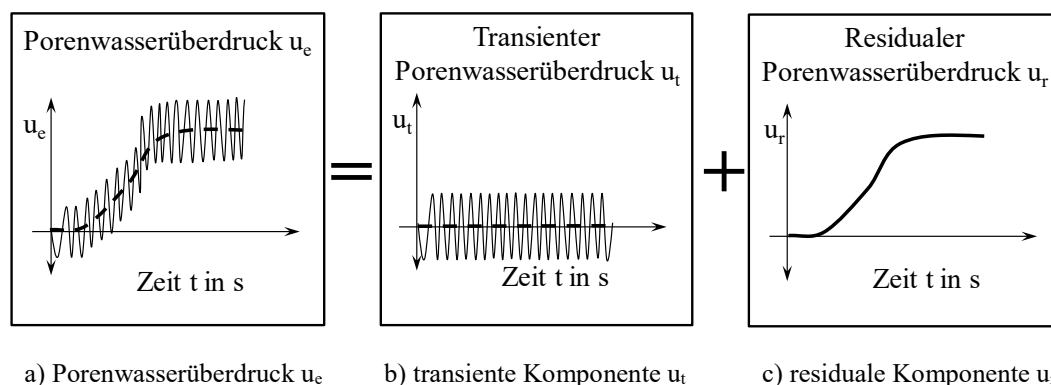


Abb. 2.13: Komponenten des Porenwasserüberdrucks (nach Kudella et al. (2006))

Die Zusammenhänge zwischen Porenwasserüberdruck und zyklischer Belastung wurden für wassergesättigte bindige Böden von Hu (2000) untersucht. Weiterhin untersuchten Shenton (1981), Lentz und Baladi (1980), Diyaljee und Raymond (1982) und Hettler (1987) das Verhalten nichtbindiger Böden und Schotter (Gotschol, 2002). Untersuchungen nach Young et al. (2009) zeigen die Entwicklung des Porenwasserüberdrucks in einer Böschung bei schneller Druckänderung infolge solitärer Wellen. Unter zyklischer Belastung kann die Einwirkung über die Dauer einer Wellenperiode zu elastischen und über die Dauer einer Sturmflut zu einer fortschreitenden plastischen Verformung führen, dessen Gradient über die Zeit abnimmt. Während eines Sturmflutereignisses oder über die Dauer einer Sturmflutsaison kann ein statischer Zustand angenähert werden. Wird jedoch kein stabiler Zustand durch beruhigte Verformung erreicht, so handelt es sich um dynamisches Versagen.

Bodenspannung: Die totale Spannung im Boden σ ist die Summe der effektiven Spannungen σ' an den Berührungspunkten der einzelnen Körner sowie des Porenwasserdrucks u . Übersteigt der Porenwasserdruck u den hydrostatischen Druck, so entsteht ein Porenwasserüberdruck im Korngerüst, wodurch die Scherfestigkeit teilweise reduziert wird bzw. vollständig verloren geht. In diesem Zustand ergibt sich die effektive Spannung σ' zu Null ($\sigma' = \sigma - u = 0$), sodass der Scherwiderstand im Mohr-Coulomb-Modell ($\tau = \sigma' \cdot \tan\varphi' + c'$) für granulares Material ($c' = 0$) entfällt, womit das Korngefüge die Stabilität verliert. Durch ausreichend hohe Auflast, zum Beispiel durch eine Deckschicht kann der Verflüssigung

des Untergrundes entgegengewirkt werden. Damit ist die totale Spannung im Boden die bestimmende Größe für Verformungen der tragenden Bodenmatrix und die effektive Spannung die maßgebende Größe für Erosionsprozesse im Boden. Der Porenwasserdruck u wirkt entgegen der effektiven Spannung und nimmt mit abnehmender Durchlässigkeit zu (Groot et al., 2006).

Gasanteil: Die lokale Verflüssigung durch Porenwasserüberdruck kann auch entstehen, wenn ein gewisser Gasanteil im Porenraum vorhanden ist. Neben Gasblasen im Porenraum beeinflusst der gelöste Gasanteil des Porenwassers weiterhin durch die höhere Kompressibilität des Fluids die Strömung und die Druckverteilung im porösen Medium. Hierbei wird in gesättigte, teilgesättigte und ungesättigte Böden (mit zunehmenden Gasanteil) unterschieden. Eine wichtige Grundlage bildet der Ansatz nach van Genuchten (1980), der den Zusammenhang zwischen Durchlässigkeit, Sättigungsgrad und Kapillardruck (bzw. Wasserstand) beschreibt. Die Einflüsse der Kompressibilität und der Durchlässigkeit auf den Porenwasserüberdruck wurden in hydraulischen Laborexperimenten nach Ewers und Karl (2017) untersucht. Der Sättigungsgrad lässt sich nur schwer in Laborexperimenten kontrollieren, sodass die Ermittlung von Durchlässigkeitsbeiwerten großen Unsicherheiten unterliegt und eine numerische Modellierung erforderlich wird. Untersuchungen von (teilgesättigten) Sandproben zeigen jedoch den großen Einfluss des Sättigungsgrads auf die relative Durchlässigkeit $k_f/k_{f(sat)}$ und die Abhängigkeit der Strömungsrichtung beim Transport von Luftblasen (Wyckoff und Botset, 1936; Chapuis et al., 1989). Weiterhin beeinflussen eingeschlossene Luftblasen im Porenraum neben den hydraulischen Prozessen auch bodenmechanische Prozesse der Bodenmatrix durch Änderungen der effektiven Spannung (Sandven et al., 2007). Eine wichtige Größe ist die relative Kompressibilität im Verhältnis der Kompressibilität des Porenfluids und der Bodenmatrix (Young et al., 2009).

Die Grundlage der Kompressibilität des Porenwassers bildet das Gesetz nach Boyle-Mariotte, nach dem sich das Volumen eines idealen Gases bei gleicher Temperatur linear zum Druck verhält. Durch Abnahme des Luftvolumens im Porenraum bei steigendem Druck, findet ein Ausgleich durch einströmendes Porenwasser statt. Dies hat eine Änderung des Porenwasserdrucks zur Folge, wodurch die effektive Spannung und die Verformung des Bodens beeinflusst werden (Montenegro et al., 2015; Schulze und Stelzer, 2015). Unter dem Einfluss welleninduzierter oszillierender Strömung entsteht eine verzögerte Reaktion des Porenwasserdrucks auf die Änderung des äußeren dynamischen Wasserdrucks. Beim Druckanstieg (Wellenberg) werden Gasblasen im Porenraum komprimiert, wodurch Wasser in den Porenraum einströmt. Durch den verzögerten Anstieg des Porenwasserdrucks steigt die effektive Spannung in dieser Phase an und die Bodenmatrix wird komprimiert. In der Phase des abnehmenden Drucks unter dem Wellental nimmt der Porenwasserdruck verzögert ab, sodass die effektive Spannung zunimmt und sich die Bodenmatrix ausdehnt (Sumer und Fredsøe, 2002; Groot et al., 2006; Schulze und Stelzer, 2015).

Weitere Untersuchungen nach Montenegro et al. (2015) und Wayllace et al. (2015) haben einen Einfluss des Gasanteils in Laborexperimenten zur Durchströmung gezeigt. Der Gasanteil in Laborversuchen kann nicht exakt erfasst werden und kann im Bereich von 1 % bis 5 % angenommen werden. In der Natur variieren die Gasanteile im Meeresboden in ständig wasserüberdeckten Bereichen und nehmen mit größerer Wassertiefe und steigendem Porenwasserdruck ab (Köhler und Schwab, 2005; Groot et al., 2006; Tørum, 2007; Sandven et al., 2007). Schon bei geringen Gasanteilen von 0,3 % wird der Porenwasserdruck über die Tiefe sehr schnell durch Dämpfung reduziert, sodass sich ein großer Porenwasserdruckgradient in den oberen Schichten des Basismaterials einstellen kann (Groot et al., 2006; Sumer und Fredsøe, 2002).

Konsolidierung und Verformung des Bodens: Das dynamische Verhalten von Porenwasserdruck und Konsolidierung des Bodens sind die steuernden Prozesse der Bodenverflüssigung. Die Theorie nach Biot (1956b) zur linearen Beschreibung der Konsolidierung gesättigter poröser Medien bildet eine vereinfachte Grundlage vieler Untersuchungen in der Kontinuumsbetrachtung auf der Makroskala. Hierdurch kann die Bewegung des Bodens und des Fluids sowie die Spannungs-Dehnungsbeziehung in Abhängigkeit der Porosität n , die Rohdichten des Bodens ρ_s und des Fluids ρ_w beschrieben werden. Die Verformung kann nach dem Hookeschen Gesetz als lineare Funktion der Spannung beschrieben werden. Eine Prinzipskizze des Prozesses der Konsolidation hierzu ist in Abbildung 2.14 dargestellt.

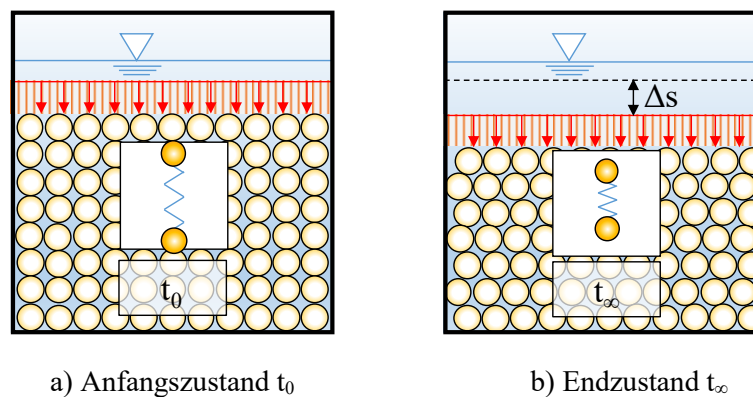


Abb. 2.14: Prinzipskizze der Konsolidation

In Abbildung 2.14 a) ist der Anfangszustand des Bodens bei der Aufgabe einer zusätzlichen Last dargestellt. Durch die Auflast wird der Boden verdichtet wodurch sich eine Verformung der Oberkante (Δs) zum Endzustand einstellt (Abbildung 2.14 b)).

Verformung der Bodenmatrix: Die Verformung der Bodenmatrix u kann in Abhängigkeit des Porenwasserdrucks p mit dem Modell der u - p -Approximation nach Zienkiewicz et al. (1980) beschrieben werden. Dieses Modell wurde für die zweidimensionale Betrachtung nach Jeng und Rahman (2000) erweitert. Die Beschleunigung des Porenfluids ist in der allgemeinen Formulierung mit dem Ansatz nach Darcy vernachlässigt. Zur dynamischen Modellierung mit der vollständigen Berücksichtigung der Beschleunigung und Trägheit des Porenfluids sowie der Materialbewegung existieren nur wenige Untersuchungen (Jeng, 2004; Cha, 2003). Ulker et al. (2012) untersuchten die dynamischen Prozesse im Meeresboden unter einem Caisson Wellenbrecher bei brechenden Wellen. Hierbei hat sich gezeigt, dass die nicht vollständig dynamische Formulierung im Gegensatz zur vollständig dynamischen Formulierung zu größeren Amplituden der Resonanz führen.

Die Verformung der Bodenmatrix infolge zyklischer Belastung kann in (i) elastische, (ii) elasto-plastische und (iii) hypoplastische Verformungen unterteilt werden. Ab dem Erreichen der Fließbedingung kann das plastische Verhalten eines Bodenkörpers in ideal plastisches Verhalten, Verfestigung und Entfestigung unterschieden werden. Die elastische Verformung von Böden kann durch das eindimensionale Modell nach Terzaghi (1943) mit der Konsolidierung im gesättigten Zustand beschrieben werden (Biot, 1941; Biot, 1955). Durch das Verdrängen des Porenwassers übernimmt die Bodenmatrix schrittweise einen größeren Anteil der Spannungen und es kommt zur Verformung des Bodenkörpers. Die Bodenmatrix wird nach Terzaghi als elastisches poröses Medium mit wassergefüllten Poren betrachtet. Dieses Modell kann anschaulich als ein gesättigter Schwamm betrachtet werden (Kolymbas, 2011b). Das vereinfachte Modell nach Biot (1941) bezieht sich auf isotrop poröse Medien (richtungsunabhängig), reversible lineare Spannungs-Dehnungs-Beziehungen im Gleichgewichtszustand, kleine Verformungen und inkompressibles Porenwasser (mit Gasblasen). Die Fließbedingungen in der Porenstruktur werden hierbei nach dem Darcy-Gesetz (siehe Abschnitt 2.2.3) beschrieben (Biot, 1941).

Das vereinfachte Modell nach Biot (1941) wurde später von Biot (1955), (1956a) für anisotrope Böden zur linearen Viskoelastizität und zur dreidimensionalen Konsolidierung erweitert. Hierbei bezieht sich die Verformung auf poröse Medien, die von viskosen Fluiden durchströmt werden. In diesem Zusammenhang fasst der Begriff Viskoelastizität die thermodynamischen und mechanischen Prozesse mit den Spannungs-Dehnungsbeziehungen in Stoffgesetzen zusammen (Kolymbas, 2011b). Poro-elastoplastische Modelle wurden zur Beschreibung der welleninduzierten Reaktion von Meeresböden entwickelt, um große Verformungen durch welleninduzierte Instabilitäten des Meeresgrunds besser abbilden zu können (Jeng, 2004).

Das hypoplastische Modell nach Herle (1997) und Wolffersdorff (1997) basiert auf dem dynamischen Konsolidierungsmodell nach Biot. Niemunis und Herle (1997) erweiterten dieses Modell um die intergranularen Dehnungen und Zhou et al. (2004) führten hierzu die Implementierung zur numerischen Simulation durch (siehe auch Abschnitt 2.3.2).

In Abbildung 2.15 ist eine Übersicht der Bodenmodelle mit den wichtigsten Eigenschaften zu Elastizitäts- und Plastizitätsmodellen dargestellt. Die Bodenmodelle können diesen Hauptgruppen und den daraus abgeleiteten gekoppelten Modellen zugeordnet werden (Kolymbas, 2011a).

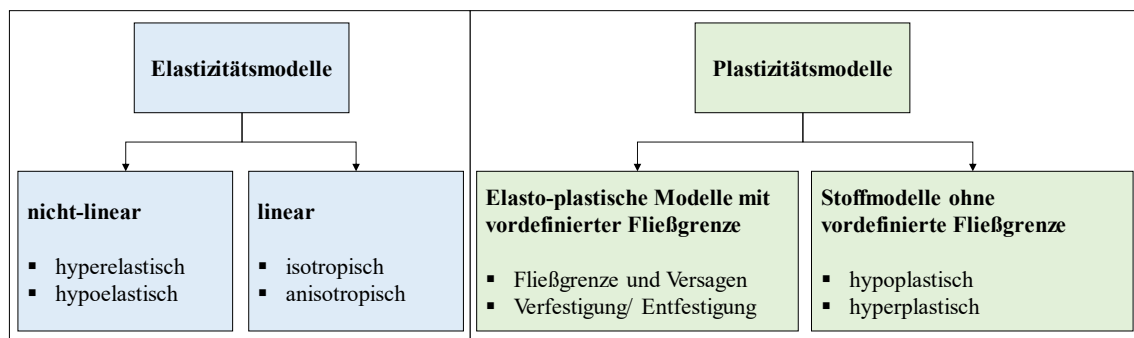


Abb. 2.15: Hauptgruppen der Bodenmodelle (modifiziert nach El Safti (2015))

Elastische Verformungen sind unabhängig vom Belastungsverlauf und im Spannungs-Dehnungsdiagramm folgt die Be- und Entlastung dem gleichen Pfad. Das Hookesche Gesetz beschreibt die linear elastische Verformung mit dem Elastizitätsmodul E wie folgt (Lade, 1977):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.16)$$

mit dem Elastizitätsmodul E [N/m²], der Spannung σ [N/m²] und der Dehnung ε [%]

(Elasto-)Plastische Verformungen folgen im Gegensatz zu elastischem Verhalten nicht dem gleichen Pfad bei Be- und Entlastung (siehe Abbildung 2.16), sodass der Ausgangszustand nach Entlastung nicht wieder erreicht wird. Die durch Belastungen hervorgerufenen Formänderungen in Filteraufbauten aus Sand und Kies bilden sich nicht zurück und können daher in Verfestigung und Entfestigung resultieren (Ottosen und Ristinmaa, 2005). Die bekannten Ansätze zur elasto-plastischen Verformung basieren auf Drucker und Prager (1952) sowie Lade und Duncan (1975) (Lade, 1977).

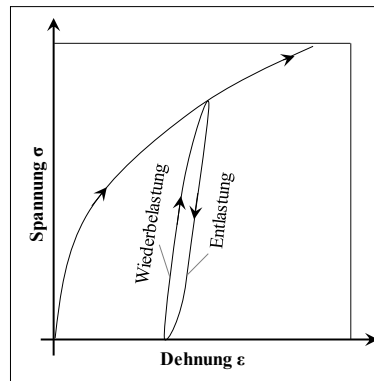


Abb. 2.16: Beispiel des Spannungs-Dehnungsverlaufs bei Entlastung und Wiederbelastung (nach Kolymbas (2011a))

Hypoplastische Verformungen unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung können durch die intergranularen Dehnung und Änderung der Steifigkeit erfasst werden. Die physikalischen Zusammenhänge der Hypo-plastizität mit den hypoplastischen Gleichungsparametern wurde nach Herle (1997) in Abhängigkeit von Kornverteilung und Eigenschaften des Einzelkorns beschrieben. Das hypoplastische Modell weist eine besonders gute Eignung für nichtbindige Böden auf (Fellin, 1999). Die Spannungen σ_{ij} können als Funktion der Steifigkeit E_{ijkl} und der Verformung u_{kl} beschrieben werden ($\sigma_{ij} = f(E_{ijkl}; u_{kl})$). Dieser Zusammenhang ist nicht linear, da die Steifigkeit E_{ijkl} von der Verformung u_{kl} abhängig ist.

Zusätzlich zur Verformung werden Grenzbedingungen benötigt, die den Punkt des Versagens (Bruchkriterium) beschreiben. Das Bruchkriterium kann durch eine Kappe zusätzlich zur Fließgrenze definiert werden (Kolymbas, 2011a).

Die Reaktion des Porenwasserdrucks im Meeresgrund und im Filtermaterial auf die hydraulische Einwirkung aus welleninduzierten Strömungen und Druckänderungen wird hauptsächlich durch den Fließwiderstand (Porengeometrie, Gasgehalt) und mögliche Auflasten bestimmt. Kontakterosion zwischen Meeresgrund und einem aufliegenden Filter entsteht durch die welleninduzierte Porenwasserströmung und durch die zeitweise Reduktion der widerstehenden Kräfte (effektive Spannungen) im Basismaterial durch Porenwasserüberdruck. Bei zu geringer Filterauflast kann dies zur lokalen Verflüssigung der oberen Schichten des Basismaterials unter einem Wellental führen.

Die Konsolidierungsmodelle beschreiben auf der Makroskala den Zusammenhang zwischen Auflast, Porenwasserdruck und Verformung des Bodenkörpers in makroskaliger Betrachtung. Unter Wellenbelastung ergibt sich in einem Filteraufbau ein ständiger Wechsel zwischen Konsolidierung und Schwellung. Durch die Zunahme der Sättigung in Abhängigkeit des Absolutdrucks ergibt sich für den Porenwasserüberdruck eine Abhängigkeit der Wassertiefe. Die Dämpfung des Porenwasserdrucks nimmt daher mit größeren Wassertiefen ab. Durch Hebungen und Senkungen führt dieser Prozess zu Setzungen und Verdichtung des Aufbaus. Die Interaktion zwischen hydraulischen und bodenmechanischen Prozessen ist von besonderer Bedeutung für die Kontakterosion, innere Stabilität (Suffosion) sowie das dynamische Verhalten von Kornfiltern unter der Einwirkung oszillierender Strömung. Weiterhin bedarf es einer getrennten Betrachtung der hydraulischen und bodenmechanischen Prozesse in Laborexperimenten und einer Kopplung dieser Prozesse zur numerischen Modellierung.

2.2.3 Lineare und nichtlineare Ansätze zu Strömungen in porösen Medien

Laminare Strömungsregime: Erste Untersuchungen zu dem Zusammenhang zwischen hydraulischem Gradienten und einem spezifischen Durchfluss in porösen Medien wurden nach Darcy (1856) unter laminaren Fließzuständen ($Re^* < 1$) durchgeführt. Die Filtergeschwindigkeit v_f wird als mittlere Fließgeschwindigkeit mit dem Verhältnis von spezifischem Durchfluss q und der durchströmten Querschnittsfläche A [m^2] mit $v_f = q/A$ [m/s] beschrieben. Mit diesen Untersuchungen wird der Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s] als Verhältnis von Filtergeschwindigkeit v_f und hydraulischem Gradienten $i = \Delta h/\Delta l$ definiert:

$$\frac{q}{A} = v_f = k_f \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (2.17)$$

Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f kann experimentell in einem Permeameter oder nach empirischen Ansätzen basierend auf einem charakteristischen Korndurchmesser d_c ermittelt werden. Die Einschränkungen der empirischen Ansätze liegen in der untersuchten charakteristischen Korngröße d_c und der aus der Kornverteilung ermittelten Ungleichförmigkeit d_{60}/d_{10} des porösen Mediums. Der häufig angewendete Ansatz nach Hazen (1892) wird nach Mavis und Wilsey (1936) mit dem Korndurchmesser d_{10} bei 10 % Massendurchgang mit folgender Gleichung definiert (Mavis und Wilsey, 1936):

$$k_{f(Hazen)} = c \cdot d_{10}^2 \quad (2.18)$$

mit:

- $k_{f(Hazen)}$: Durchlässigkeitsbeiwert nach Hazen in m/s
- c : dimensionsloser Formparameter der Porengeometrie
- d_{10} : Korndurchmesser bei 10 % Massendurchgang in mm

Der Formparameter c wird durch die Porengeometrie des Materials bestimmt und liegt nach Hazen (1911) für Sand mit lockerster Lagerung bei $c = 115,7$. Der Anwendungsbereich des Ansatzes nach Hazen ist nach Mavis und Wilsey (1936) auf einen Korndurchmesser $d_{10} = 0,1$ bis $3,0$ mm und einer Ungleichförmigkeit von $d_{60}/d_{10} < 5$ beschränkt. Eine Zusammenfassung der weiteren Untersuchungen und Weiterentwicklungen des Ansatzes nach Hazen ist in Chapuis (2012) gegeben. Hierin wird die Kopplung mit dem Ansatz nach Taylor (1948) als Verbesserung des Ansatzes nach Hazen (1892) wie folgt empfohlen (Chapuis, 2012):

$$k_f = k_{f(Hazen)} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (2.19)$$

mit:

- k_f : Durchlässigkeitsbeiwert in m/s
- $k_{f(Hazen)}$: Durchlässigkeitsbeiwert nach Hazen (Gleichung 2.18) in m/s
- n : Porosität

Hazen (1892) und Dupuit (1863) haben auf Basis des Darcy-Gesetzes (Gleichung 2.17) weitere theoretische Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur und Viskosität durchgeführt. Nach Hazen wurde das Darcy-Gesetz zur Berücksichtigung der Viskosität in Abhängigkeit der Temperatur erweitert (Narasimhan und Lage, 2001). Erwärmung und Abkühlung des Fluids oder der Bodenmatrix führen zu nichtlinearen Änderungen der Durchlässigkeit. Die Modellierung der Abhängigkeit zwischen Temperatur und Viskosität des Porenwassers wurde unter anderem in Dybbs und Edwards (1984) zusammengefasst.

Die Durchlässigkeit einzelner poröser Schichten kann mit dem Darcy-Gesetz durch den Durchlässigkeitsbeiwert k_f beschrieben werden. In der Betrachtung mehrerer in Reihe durchströmter poröser Schichten kann der äquivalente Durchlässigkeitsbeiwert $k_{f,eq}$ in Abhängigkeit der einzelnen Durchlässigkeitsbeiwerte und der jeweiligen Schichtdicke als harmonischer Mittelwert bestimmt werden:

$$k_{f,eq} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta z_i}{k_{f,i}}} \quad (2.20)$$

mit:

$k_{f,eq}$: äquivalenter spezifischer Durchlässigkeitsbeiwert in m/s

$k_{f,i}$: Durchlässigkeitsbeiwert der Schicht i in m/s

Δz_i : Dicke der Schicht i in m

Turbulentes Strömungsregime: Die Durchlässigkeit wurde basierend auf dem Darcy-Gesetz auch auf turbulente Strömungen übertragen. Die Zunahme der Reibungskräfte im Porenraum wurden nach Brinkman (1949) untersucht und durch eine Erweiterung der Darcy-Gleichung mit einem zusätzlichen Reibungsterm in der Darcy-Brinkman-Gleichung beschrieben (Zeng und Grigg, 2006). Die Strömung im Porenraum kann in Analogie zur Rohrströmung betrachtet werden. Nach Poiseuille nimmt bei laminarer Strömung die Fließgeschwindigkeit in einem Rohr mit dem Quadrat des Durchmessers zu. Dazu wurde nach Barends (1994) festgestellt, dass sich der Durchlässigkeitsbeiwert k_f in laminarer Strömung proportional zu d_c^2 und in turbulenter Strömung proportional zu $d_c^{0,5}$ verhält. Terzaghi und Peck (1961) beschreiben die Durchströmung der Porengeometrie mit dem Poiseuilleschen Gesetz, wodurch die Durchlässigkeit im laminaren Fließzustand mit dem Quadrat des charakteristischen Korndurchmessers ermittelt werden kann.

Ein weiterer Einfluss ergibt sich aus der unterschiedlichen Ungleichförmigkeit U bei gleichen charakteristischen Korndurchmessern (häufig d_{10}). Aus diesem Grund wurde nach Beyer (1964) ein Korrekturbeiwert zur Berücksichtigung der Ungleichförmigkeit eingeführt. Zu dem Zusammenhang zwischen geometrischen Größen (Korn- und Porendurchmesser) und der Durchlässigkeit gibt es eine Vielzahl experimenteller und theoretischer Untersuchungen (Hazen, 1892; Beyer, 1964; Bear, 1972; Bear und Corapcioglu, 1984; Shepherd, 1989). Weiterhin ist der Einfluss des Luftgehalts im Porenraum durch das dynamische Verhalten des Gases von großer Bedeutung für die Durchlässigkeit. Die Strömung von Luft im Porenraum ist im Gegensatz zu der Strömung von Wasser am Porenrand größer Null, sodass die Durchlässigkeit der Luft höher als die des Wassers ist (Parker et al., 1987; Springer et al., 1998).

Zur Berücksichtigung des zusätzlichen Fließwiderstands unter turbulenter Strömung ($Re^* > 1$) wurde Gleichung 2.1 nach Dupuit (1863) und Forchheimer (1903) mit dem zusätzlichen quadratischen Term erweitert und kann in der Differenzialschreibweise wie folgt dargestellt werden (Narasimhan und Lage, 2001):

$$-\nabla p = \frac{\eta}{K} \cdot v_f + C \cdot \rho \cdot v_f \cdot |v_f| \quad (2.21)$$

mit:

∇p : Druckgradient

η : dynamische Viskosität in m²/s

K : Durchlässigkeitskoeffizient

v_f : Filtergeschwindigkeit in m/s

C : Form-Koeffizient für das poröse Medium

ρ : Dichte des Fluids in kg/m³

Forchheimer formulierte den Fließwiderstand mit dem hydraulischen Gradienten i in Abhängigkeit der Filtergeschwindigkeit v_f wie folgt:

$$i = \underbrace{a \cdot v_f}_{\text{laminarer Term}} + \underbrace{b \cdot v_f \cdot |v_f|}_{\text{turbulenter Term}} \quad (2.22)$$

mit:

- i : hydraulischer Gradient
- v_f : Filtergeschwindigkeit im porösen Medium in m/s
- a : Forchheimer-Koeffizient für laminaren Fließwiderstand in s/m
- b : Forchheimer-Koeffizient für turbulente Widerstandskräfte in s²/m²

Der quadratische Term in Gleichung 2.22 wird mit dem Betrag der Filtergeschwindigkeit ermittelt, um Richtungswechsel der Strömung berücksichtigen zu können. Eine Übersicht der Untersuchungen zur Ermittlung der Forchheimer-Koeffizienten für stationäre Strömung im Forchheimer-Regime ist mit einer Auswahl in Tabelle 2.4 gegeben. Die Porosität ist dabei eine der wichtigsten Größen des Fließwiderstands poröser Medien und damit auch für die Bestimmung der Forchheimer-Koeffizienten. Nach Taylor (1948) besteht folgender Zusammenhang zwischen den Forchheimer-Koeffizienten a und b und der Porosität n :

$$a = \alpha \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \frac{v}{g \cdot d_c^2} \quad (2.23)$$

$$b = \beta \cdot \frac{1-n}{n^3} \cdot \frac{1}{g \cdot d_c} \quad (2.24)$$

mit:

- a : Forchheimer-Koeffizient der laminaren Strömungskomponente in s/m
- b : Forchheimer-Koeffizient der turbulenten Strömungskomponente in s²/m²
- α : Widerstandskoeffizient der laminaren Strömungskomponente
- β : Widerstandskoeffizient der turbulenten Strömungskomponente
- n : Porosität
- v : kinematische Viskosität m²/s
- g : Erdbeschleunigung in m/s²
- d_c : charakteristischer Korndurchmesser in m
- d_{eq} : äquivalenter Korndurchmesser entsprechend einer Kugel gleicher Dichte und gleicher Masse in m
- d_{15} : Korndurchmesser bei 15 % Massendurchgang in m
- d_{50} : Korndurchmesser bei 50 % Massendurchgang in m

Tab. 2.4: Untersuchungen zu den Forchheimer Koeffizienten α und β unter stationärer Strömung nach Burcharth und Andersen (1995), Gent (1992), Muttray (2000) und Lin (2008)

Autor	α	β	α	β
Ergun (1952)	$\alpha \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \frac{v}{g \cdot d_{50}^2}$	$\beta \cdot \frac{1-n}{n^3} \cdot \frac{1}{g \cdot d_{50}}$	150	1,75
Engelund (1953)	$\alpha \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \frac{v}{g \cdot d_{eq}^2}$	$\beta \cdot \frac{1-n}{n^3} \cdot \frac{1}{g \cdot d_{eq}}$	780	1,8 - 3,6
Adel (1987)	$\alpha \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \frac{v}{g \cdot d_{15}^2}$	$\beta \cdot \frac{1-n}{n^3} \cdot \frac{1}{g \cdot d_{15}}$	75 - 350	0,9 - 5,3
Shih (1991)	$\alpha \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \frac{v}{g \cdot d_{15}^2}$	$\beta \cdot \frac{1-n}{n^3} \cdot \frac{1}{g \cdot d_{15}}$	780 - 1500	1,8 - 3,6
Van Gent (1992)	$\alpha \cdot \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \frac{v}{g \cdot d_{50}^2}$	$\beta \cdot \frac{1-n}{n^3} \cdot \frac{1}{g \cdot d_{50}}$	1000	1,1

Der charakteristische Korndurchmesser d_c wird häufig auf den Korndurchmesser bei 15 % und 50 % Massendurchgang als d_{15} beziehungsweise d_{50} bezogen. Nach Shih (1991) wird für weitgestuftes Material d_* als charakteristischer Korndurchmesser der Kornverteilung mit d_{15} , d_{50} und d_{85} vorgeschlagen:

$$d_* = d_{15} \cdot \left(\frac{d_{15}}{d_{50}} \right)^{-1,11} \cdot \left(\frac{d_{50}}{d_{85}} \right)^{0,52} \quad (2.25)$$

Die Forchheimer-Gleichung 2.22 beinhaltet den Forchheimer-Koeffizienten b mit dem Widerstandskoeffizienten der turbulenten Strömung β . Der Widerstandskoeffizient β ist Gegenstand vieler Untersuchungen, da die Übertragung von stationären auf instationäre Fließzustände problematisch ist. Weiterhin ist der Zusammenhang des linearen Darcy-Gesetzes im linearen Anteil der Forchheimer-Gleichung bei höheren Fließgeschwindigkeiten nicht gegeben und es zeigt sich eine Abhängigkeit von der Reynoldszahl Re (Barree und Conway, 2004).

Andersen et al. (1992) und van Gent (1993) haben in Laborexperimenten mit unterschiedlichen Materialien den Einfluss der Keulegan-Carpenter-Zahl KC (Gleichung 2.27) auf β unter oszillierender Strömung untersucht und dabei eine Reduzierung des Forchheimer-Koeffizienten β unter oszillierender Strömung gegenüber (stationärer) gleichgerichteter Strömung festgestellt. Dabei verhält sich β umgekehrt proportional zur Keulegan-Carpenter-Zahl KC und geht bei einer unendlich großen Wellenperiode ($T \rightarrow \infty$) in den Zustand unter stationärer Strömung über (van Gent, 1993). Der Forchheimer-Koeffizient b aus Gleichung 2.26 geht damit unter gleichgerichteter Strömung ($KC \rightarrow \infty$) in die Gleichungen in Tabelle 2.2 über. Der Forchheimer-Koeffizient b kann mit dem Widerstandskoeffizienten β nach van Gent (1993) unter oszillierender Strömung wie folgt ermittelt werden:

$$b = \beta \cdot \left(1 + \frac{7,5}{KC}\right) \cdot \left(\frac{1-n}{n^3}\right) \cdot \left(\frac{1}{g \cdot d_{n50}}\right) \quad (2.26)$$

$$KC = \frac{U \cdot T}{n \cdot d_{n50}} \quad (2.27)$$

mit:

- b: Forchheimer-Koeffizient der turbulenten Strömungskomponente in s^2/m^2
- β : Widerstandskoeffizient der turbulenten Strömungskomponente
- KC: Keulegan-Carpenter-Zahl
- n: Porosität
- g: Erdbeschleunigung in m/s^2
- d_{n50} : nominaler Korndurchmesser basierend auf dem Gewicht bei 50 % Überschreitung in m
- U: Amplitude der Fließgeschwindigkeit in m/s
- T: Wellenperiode in s

Aus den Untersuchungen nach Forchheimer (1903) wurde die erweiterte Forchheimer-Gleichung nach Polubarinova-Kochina (1962) für instationäre turbulente Strömungen in porösen Medien entwickelt. Neben dem laminaren ($a \cdot v_f$) und dem turbulenten Widerstandsterm ($b \cdot v_f \cdot |v_f|$) in Gleichung 2.11 wird in Gleichung 2.28 ein zusätzlicher Trägheitsterm $c \cdot \partial v_f / \partial t$ (mit der lokalen Beschleunigung) berücksichtigt.

$$\dot{i} = \underbrace{a \cdot v_f}_{\text{laminarer Term}} + \underbrace{b \cdot v_f \cdot |v_f|}_{\text{turbulenter Term}} + \underbrace{c \cdot \frac{\partial v_f}{\partial t}}_{\text{Trägheitsterm}} \quad (2.28)$$

mit:

- i: hydraulischer Gradient
- v_f : Filtergeschwindigkeit im porösen Medium in m/s
- a: Forchheimer-Koeffizient für laminaren Fließwiderstand in s/m
- b: Forchheimer-Koeffizient für turbulente Widerstandskräfte in s^2/m^2
- c: Forchheimer-Koeffizient für Trägheitskräfte in s^2/m
- t: Zeit in s

Der Fließwiderstand in Gleichung 2.28 setzt sich aus dem laminaren Widerstand, dem turbulenten Widerstand und der zusätzlichen Trägheit zusammen (Burcharth und Andersen, 1995; Gent, 1992). Die hydrodynamische Modellierung von Strömungen in porösen Medien basiert auf den häufig verwendeten Navier-Stokes-Gleichungen (Gleichung 2.35). Nach Whitaker (1996) wurden die Navier-Stokes Gleichungen für die volumengemittelten Impulsgleichungen unter der Anwendung der Darcy-Forchheimer-Gleichung formuliert. Die Strömung eines inkompressiblen, viskosen Fluids in einem homogenen, isotropen Medium wurde mit der gemittelten Navier-Stokes-Gleichung nach Gent (1992) zur Anwendung auf oszillierende Strömungen formuliert.

Zur Ermittlung des Trägheitskoeffizienten c wurden hydraulische Laborversuche durchgeführt und daraus verschiedene theoretische und empirische Ansätze abgeleitet. Sollit und Cross (1972) nehmen dazu die Fließgeschwindigkeit im Porenraum als charakteristische Fließgeschwindigkeit an und verwenden einen virtuellen Masseterm im Verhältnis zur Porosität (Burcharth und Andersen, 1995; Gent, 1992; Muttray und Oumeraci, 2005). Mit dem Koeffizienten der virtuellen Masse c_m kann der Koeffizient c des Trägheitsterms nach Madsen (1974) als quadratischer Widerstandsterm ermittelt werden (Burcharth und Andersen, 1995):

$$c = \frac{1}{n \cdot g} \cdot \left(1 + c_m \cdot \left(\frac{1-n}{n} \right) \right) \quad (2.29)$$

$$c_m = (1-n) \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{v}{n} \right) \quad (2.30)$$

mit:

- c: Forchheimer-Koeffizient für Trägheitskräfte in s^2/m
- c_m : Koeffizient des virtuellen Masseterms in s^2/m
- n: Porosität
- g: Erdbeschleunigung in m/s^2
- t: Zeit in s
- v: lokale Fließgeschwindigkeit im Porenraum in m/s

Hall et al. (1995) untersuchten den Unterschied zwischen gleichgerichteter und oszillierender Strömung. Unter oszillierender Strömung wird der Trägheitsterm beim Wellenberg und Wellental durch die Abnahme der Beschleunigung zu $c \cdot \partial v / \partial t = 0$. Bei bekannten Forchheimer-Koeffizienten a und b kann der Koeffizient c aus der Phasenverschiebung zwischen hydraulischem Gradienten und Filtergeschwindigkeit (grafisch) ermittelt werden (Hall et al., 1995).

Die lokale Beschleunigung im Porenraum wird bei konstanter Porengeometrie durch die instationären Randbedingungen, z. B. aus der Orbitalströmung einer Welle (Abschnitt 2.2.1), bestimmt. Weiterhin wird das Fluid durch das poröse Medium im Wechsel der durchströmten Querschnittsfläche (Porenkanal) beschleunigt. So tritt neben der lokalen auch die konvektive Beschleunigung auf (siehe Abbildung 2.17). Aus der Summe der lokalen ($\partial v / \partial t$) und der konvektiven Beschleunigung ($\mathbf{v} \cdot (\text{grad } \mathbf{v})$) ergibt sich die totale Beschleunigung ($d\mathbf{v}/dt$) (Burcharth und Andersen, 1995):

$$\underbrace{\frac{d\mathbf{v}}{dt}}_{\text{totale Beschleunigung}} = \underbrace{\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}}_{\text{lokale Beschleunigung}} + \underbrace{\mathbf{v} \cdot (\text{grad } \mathbf{v})}_{\text{konvektive Beschleunigung}} \quad (2.31)$$

Die Interaktion zwischen den Einzelkörnern und der Grenzschicht im Porenraum kann generell nicht allein durch die konvektive Beschleunigung beschrieben werden und die lokale Beschleunigung der Filtergeschwindigkeit ($\partial v / \partial t$) kann ebenfalls nicht durch die totale Beschleunigung ($d\mathbf{v}/dt$) beschrieben werden, da eine Interaktion zwischen der lokalen und konvektiven Beschleunigung durch die Grenzschichtausbildung im Porenraum besteht. Aus diesem Grund kann der Widerstandskoeffizient c_m in Gleichung 2.29 für komplexe Porengeometrien nicht theoretisch bestimmt werden.

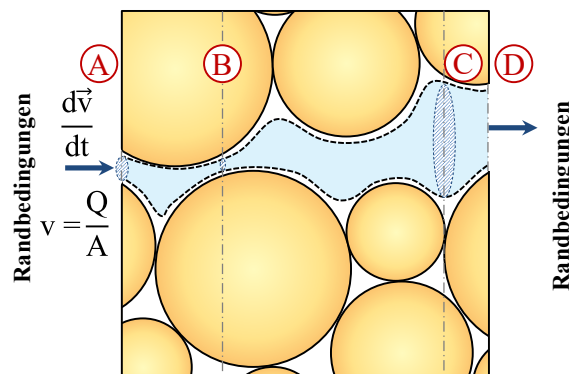


Abb. 2.17: Vereinfachte Skizze der lokalen und konvektiven Beschleunigung der Porenwasserströmung

In den Schnittebenen (A) und (D) liegen die Randbedingungen mit dem Durchfluss Q im betrachteten Kontrollvolumens vor. Durch die Querschnittsänderung zwischen Punkten (A) und (B) entsteht zusätzlich zur lokalen Beschleunigung eine konvektive Beschleunigung. Eine Verzögerung entsteht hingegen bei einer Querschnittsaufweitung im Porenraum zwischen den Punkten (B) und (C).

In diesem Zusammenhang wurden die geohydraulischen Prozesse bestimmter Materialien in den einzelnen Schichten eines geschütteten Wellenbrechers nach Muttray und Oumeraci (2005) detailliert untersucht. Aus den Untersuchungen von van Gent (1993), Muttray (2000) und Muttray und Oumeraci (2005) geht hervor, dass oszillierende Strömungen gegenüber gleichgerichteten Strömungen einen erhöhten hydraulischen Widerstand durch einen zusätzlichen turbulenten Widerstand aufgrund der behinderten Grenzschichtausbildung bei oszillierenden Strömungen hervorrufen. Es wurde auch festgestellt, dass dieser zusätzliche Widerstand verhältnismäßig gering im Vergleich zum laminaren und turbulenten Fließwiderstand ist.

Der Ansatz nach Darcy, Forchheimer und in der Erweiterung durch Polubarinova-Kochina (1962) wurde nach Lin und Karunarathna (2007) im Übergangsbereich von $10 < Re < 1000$ (bezogen auf den Korndurchmesser d_{50}) verbessert. Damit wird der hydraulische Gradient mit laminarem Term, turbulentem Term und Trägheitsterm sowie zusätzlich mit dem Widerstand im Übergang dem zwischen laminaren und turbulenten Strömungsregime wie folgt beschrieben:

$$i = \underbrace{a \cdot v_f}_{\text{laminarer Term}} + \underbrace{c_t \cdot v_f \cdot \sqrt{|v_f|}}_{\text{Übergangsbereich}} + \underbrace{b \cdot v_f \cdot |v_f|}_{\text{turbulenter Term}} + \underbrace{c \cdot \frac{\partial v_f}{\partial t}}_{\text{Trägheitsterm}} \quad (2.32)$$

$$c_t = 4,5 \cdot \frac{1-n}{n^3} \cdot \frac{\sqrt{v}}{g \cdot (d_{50})^{3/2}} \quad (2.33)$$

mit:

- i: hydraulischer Gradient
- v_f : Filtergeschwindigkeit in m/s
- a: Forchheimer-Koeffizient der laminaren Strömungskomponente in s/m
- c_t : Koeffizient des Übergangsbereichs nach Lin und Karunarathna, 2007
- b: Forchheimer-Koeffizient der turbulenten Strömungskomponente in s^2/m^2
- c: Forchheimer-Koeffizient für Trägheitskräfte in s^2/m
- $\partial v / \partial t$: lokale Beschleunigung in m/s^2
- n: Porosität
- v: kinematische Viskosität in m^2/s
- g: Erdbeschleunigung in m/s^2
- d_{50} : Korndurchmesser bei 50 % Massendurchgang in m

Die Strömung in porösen Medien kann auf der Grundlage der erweiterten Darcy-Forchheimer-Gleichung mit dem laminaren und turbulenten sowie dem zusätzlichen Trägheitsterm nach Polubarinova-Kochina (1962) beschrieben werden. Die Widerstandskoeffizienten dieser erweiterten Gleichung sind abhängig von Fluideigenschaften (Viskosität, Temperatur, Kompressibilität), Gasanteil, Strömungsregime und Porengeometrie (Kornform, Kornverteilung, Porosität, Lagerungsdichte). Weiterhin beeinflusst der Grad der Turbulenz im Verhältnis von Trägheits- und Zähigkeitskräften (ausgedrückt über die kornbezogene Reynolds-Zahl Re^*) den Fließwiderstand, sodass (bei $Re^* \gg 1$) überwiegende Trägheitskräfte gegenüber den Zähigkeitskräften des Fluids zur Abnahme der Durchlässigkeit führen.

Maßstabeffekte: Es liegen keine allgemeingültigen Ansätze vor, die den Fließwiderstand weitgestufter Filtermaterialien berücksichtigen, sodass Laborexperimente zur Ermittlung dieser Parameter erforderlich werden. Die Übertragung der Widerstandskoeffizienten aus der Literatur auf andere Porengeometrien und Strömungsbedingungen unterliegt Maßstabeffekten bei abweichendem Strömungsregime. Der Einfluss der Turbulenz auf die Durchlässigkeit ist daher durch Laborexperimente zu analysieren.

Interaktion von Strömungs- und Erosionsprozessen: Zusätzlich lässt der Fließwiderstand bei gleichbleibenden Fluideigenschaften einen Rückschluss auf Änderungen der Porenstruktur zu. Hierdurch können die Durchlässigkeit und das Strömungsregime als Indikator für die Bewertung der Filterstabilität in Laborexperimenten genutzt werden.

Vor dem Hintergrund der hydraulischen Stabilität von Kornfiltern unter oszillierender Strömung ist die Anwendung der Darcy-Forchheimer-Gleichung 2.28 zu überprüfen, um den Zusammenhang zwischen Wellenparametern und dem maßgebenden hydraulischen Gradienten herstellen zu können.

2.2.4 Phasenübergänge in porösen Medien

Zur Beschreibung der Stabilität von Kornfiltern bedarf es einer genaueren Betrachtung der Porenwasserströmung an den Schnittstellen und der Phasenübergänge der Strömungen im Filter. Bei einer Mehrphasenströmung mit einer festen Phase (Boden) und einer flüssigen Phase (Porenwasser) ergeben sich Übergänge zwischen freiem Wasser und Porenwasser (Abbildung 2.18 a)) und Porenwasser zweier angrenzender poröser Medien unterschiedlicher Durchlässigkeiten (Abbildung 2.18 b)). Ein weiterer Übergang ergibt sich zwischen gesättigtem Porenraum (Porenwasser) und ungesättigtem Porenraum (Luft) (Abbildung 2.18 c)).

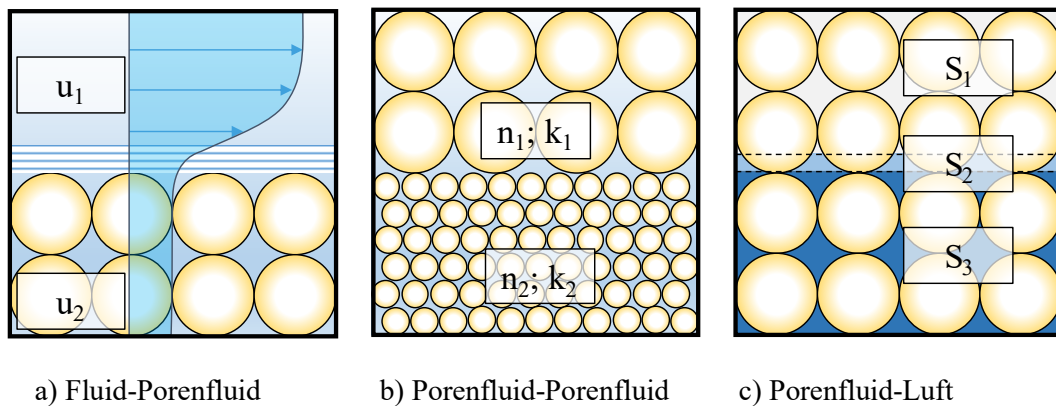


Abb. 2.18: Schnittstellen und Übergänge bei Strömungen in porösen Medien

a) Übergang zwischen Porenwasserströmung und freier Strömung (Abbildung 2.18 a)): Der Übergang zwischen porösen Medien und freier Strömung ist oft bei Gerinneströmungen und welleninduzierten Strömungen über dem Meeresgrund untersucht worden. Hierbei stellt der Übergang des Strömungsregimes von turbulenter freier Strömung (u_1) bis zur laminaren Porenwasserströmung (u_2) eine Herausforderung dar. Das Schnittstellenproblem zwischen freiem Wasser und porösen Medien ist bereits detailliert untersucht worden. Die Lösung des Schnittstellenproblems erfolgt über die Kontinuität der Fließgeschwindigkeit an der Schnittgrenze (DeGroot und Straatman, 2011). In Bezug auf die Spannungen an der Schnittfläche wird die Lösung komplexer und erfordert eine spezielle (kalibrierte) Spannungsbedingung (Costa et al., 2008).

Zur Beschreibung der Rand- und Übergangsbedingungen poröser Medien stehen Ein- und Zweibereichs-Ansätze zur Verfügung. Der Übergang an der Schichtgrenze poröser Medien zur freien Strömung kann zum Beispiel mit der Darcy-Brinkman-Gleichung (Brinkman, 1949) in Abhängigkeit der effektiven Viskosität in einer Übergangsschicht mit dem Einbereichsansatz beschrieben werden. Wichtige Grundlagen wurden von Beavers und Joseph (1967) und Bear (1972) zur Strömung über einer horizontalen porösen Schicht geschaffen. Auf dieser Grundlage wurde die Kopplung zwischen freier Strömung und Porenwasserströmung durch die Darcy-Brinkman-Gleichung (Brinkman, 1949) unter Berücksichtigung der Interaktion zwischen Sohlschubspannung und Fließgeschwindigkeit auf Grundlage des Darcy-Gesetzes verbessert. Der Zweibereichsansatz nach Beavers und Joseph (1967) beschreibt damit die Kopplung von zwei Bereichen, der freien Strömung und der Strömung im porösen Medium (Auriault, 2008 und Duman und Shavit, 2008). Eine Erweiterung dieses Ansatzes unter Verwendung der Forchheimer-Gleichung wurde von Joseph et al. (1982) vorgeschlagen. Ein hoher Grad der Komplexität wird unter instationärer oszillierender Strömung oberhalb eines hochdurchlässigen porösen Mediums mit einer turbulenten Porenwasserströmung erreicht. Eine ausführliche Zusammenfassung der geohydraulischen Prozesse im Übergang zwischen freier Strömung und Porenwasserströmung ist in Shavit (2009) gegeben.

b) Übergang zwischen zwei porösen Medien unterschiedlicher Durchlässigkeit (Abbildung 2.18 b)): Die Simulation von Strömungen in porösen Medien bedarf neben der Definition von Anfangs- und Randbedingungen einer zusätzlichen Übergangsbedingung zwischen zwei verschiedenen porösen Medien. Unterscheiden sich die Fließwiderstände zweier (in Reihe liegender) Schichten voneinander durch unterschiedliche Porosität, Durchlässigkeit und Strömungsregime ist ein Übergang des Porenwasserdrucks und der Fließgeschwindigkeit zu definieren (Jaffré, 1994). Bisher existieren nur wenige Untersuchungen zum Strömungsübergang senkrecht zur Schichtgrenze zwischen zwei porösen Medien. Die besondere Herausforderung liegt in der Änderung des Impulsflusses senkrecht zur Schichtgrenze unter turbulenter Porenwasserströmung (DeGroot und Straatman, 2011).

Zum Schnittstellenproblem in der Finite-Volumen-Methode (FVM) zwischen unterschiedlichen porösen Medien für unstrukturierte dreidimensionale Gitter liegen einige Untersuchungen vor. Bei angrenzenden Schichten unterschiedlicher Durchlässigkeit kann der äquivalente Durchlässigkeitsbeiwert an der Schichtgrenze als Näherungslösung ermittelt werden. Die Algorithmen wurden für laminare Strömung mit niedriger Reynolds-Zahl entwickelt und getestet. Für turbulente Strömung mit hohen Reynolds-Zahl liegen jedoch nur wenige Ansätze vor. Ein Algorithmus zur Lösung des Schnittstellenproblems wird von DeGroot und Straatman (2011) für unstrukturierte schiefwinklige Zellen unter Verwendung der Darcy-Forchheimer-Terme vorgeschlagen.

c) Übergang zwischen Porenwasser und Luft (Abbildung 2.18 c)): Im Übergang zwischen (teil-)gesättigten und ungesättigten porösen Medien überwiegt die Einwirkung der Kapillarität. Der zyklische Wechsel des Sättigungsgrads erzeugt eine Hysterese zwischen Zu- und Abnahme der Sättigung. Der Zusammenhang zwischen Porenwasserdruck, Sättigung und Durchlässigkeit kann durch den Ansatz nach van Genuchten (1980) beschrieben werden. Die Inhomogenität poröser Medien, der Übergang von Porenwasser zu Kapillarwasser und die Verbindung zu einer freien Strömung stellen besondere Herausforderungen bei der numerischen Modellierung dar (Neef, 2000; Helmig et al., 2006). Im Fall einer Zweiphasenströmung werden nichtlineare hyperbolische Gleichungen zur Modellierung der Sättigung am Übergang heterogener poröser Medien verwendet, wodurch Instabilität und eine unrealistische Lösung des Strömungsfelds entstehen können (Langtangen et al., 1992; Helmig und Huber, 1998; Neef, 2000; Helmig et al., 2006; DeGroot und Straatman, 2011).

Zur Beschreibung der Filterstabilität an der Schichtgrenze zum feineren Basismaterial ist die Kenntnis der Strömungsprozesse an der Grenze erforderlich. Der Übergang zwischen zwei Bodenschichten unterschiedlicher Sättigung, Porosität und Durchlässigkeit stellt eine Unstetigkeit der Strömung dar und erfordert besondere Lösungsansätze in der numerischen Modellierung.

Schichtparallele Strömung: In diesem Zusammenhang liegen viele Untersuchungen zur horizontalen Grundwasserströmung an der Schichtgrenze zweier unterschiedlicher poröser Medien vor. Hierzu stehen bereits Lösungsansätze für Mehrphasenströmungen zur Verfügung. Die meisten Ansätze zur Modellierung der Strömung basieren auf dem Darcy-Gesetz.

Schichtorthogonale Strömung: Nur wenige Ansätze berücksichtigen die horizontale Schichtung von feinem Sand und dem darüber liegenden groben Kies mit vertikaler Durchströmung. Für diesen Strömungsfall kann die Darcy-Gleichung mit einem äquivalenten Durchlässigkeitsbeiwert an der Schichtgrenze als Näherungslösung verwendet werden.

2.3 Numerische Modellierung hydrodynamischer und bodendynamischer Prozesse

Für die Bewertung der Filterfunktion und -stabilität sind neben den hydrodynamischen Prozessen der freien Strömung, auch die geohydraulischen und bodendynamischen Prozesse im Filter- und Basismaterial sowie die Interaktion mit der äußeren Strömung von großer Bedeutung. Daher wird zunächst die Modellierung der Strömung mit freier Wasseroberfläche (Abschnitt 2.3.1) und anschließend die bodendynamische sowie geohydraulische Modellierung beschrieben (Abschnitt 2.3.2).

2.3.1 Modellierung der Strömung mit freier Wasseroberfläche

Die Grundgleichungen der Strömungsmechanik beschreiben die Erhaltung von Masse, Impuls und Energie. Die Bilanzen beziehen sich auf die Gesamtmasse, Gesamtenergie und Impuls in einem Kontrollvolumen (Herwig und Schmandt, 2015). Zur mathematischen Beschreibung der Strömungsprozesse wird anhand der Fluideigenschaften wie folgt unterschieden:

- *Navier-Stokes-Gleichungen*: reibungsbehaftete, kompressible Strömungen
- *Euler-Gleichungen*: reibungsfreie, kompressible Strömungen
- *Potentialgleichung*: reibungsfreie, dehnungsfreie, inkompressible Strömungen
- *Stokes-Gleichungen*: inkompressible (schleichende) Medien ohne Trägheit

Der Ursprung der Navier-Stokes Gleichung geht auf die Eulersche Bewegungsgleichung (für ideale nichtviskose Strömungen) zurück und wurde von Navier (1827), Poisson (1831) und Stokes (1849) aufgestellt. Die Impulsgleichung besteht aus dem viskosen laminaren Strömungsterm, dem Beschleunigungs- und Trägheitsterm sowie dem Druck- und Zähigkeitsterm (Schlichting und Gersten, 2006; Truckenbrodt, 2008). Spielen die Trägheitsterme durch geringe Strömungsgeschwindigkeiten, hohe Viskosität oder geringe geometrischer Abmessung (z. B. Porendurchmesser) eine untergeordnete Rolle, so reduziert sich die Navier-Stokes-Gleichung zu Stokes-Strömungsgleichung für schleichende Strömungen, wie z. B. in porösen Medien mit geringer Durchlässigkeit bei einem geringen hydraulischen Gradienten. In diesem Fall kann der instationäre Term vernachlässigt werden (Ferziger und Peric, 2008).

a) Navier-Stokes-Gleichungen: In einem dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystem (x, y, z) können Geschwindigkeitskomponenten (u, v, w) in der Indexschreibweise ($i = 1, 2, 3$) dargestellt werden (Herwig und Schmandt, 2015). Die Kontinuitätsgleichung 2.34 bei konstanter Dichte ($\rho = \text{konst.}$) und Viskosität ($\mu = \text{konst.}$) des Fluids und die Impulsgleichung 2.35 ergeben sich zu (Durst, 2006):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.34)$$

$$\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \rho \cdot g_i \quad (2.35)$$

mit:

- u_i : Geschwindigkeitskomponente in m/s
- t : Zeit in s
- x : Raumkoordinaten i, j
- ρ : Rohdichte in kg/m³
- p : Druck in N/m²
- g_i : äußere Beschleunigung (z. B. Erdbeschleunigung) in m/s²

b) „Reynolds averaged Navier-Stokes“-Gleichungen (RANS): Nach Reynolds kann das turbulente Strömungsfeld u_i durch den Mittelwert \bar{u}_i und der turbulenten Fluktuation u'_i mit $u_i = \bar{u}_i + u'_i$ beschrieben werden. Gleiches gilt für den Druck p mit $p = \bar{p} + p'$. Die nach Reynolds gemittelten Geschwindigkeiten können in der Navier-Stokes-Gleichung (Gleichung 2.35) wie folgt dargestellt werden (Truckenbrodt, 2008):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.36)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \cdot \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} + \rho \cdot g_i \quad (2.37)$$

Die zusätzlichen Spannungskomponenten im Tensor $-\rho \cdot \overline{u'_i u'_j}$ des Reynolds-Ansatzes in Gleichung 2.37 (auch Reynoldssche Schubspannung genannt) erfordern zur Schließung der Gleichungslösung zusätzliche Ansätze. Dazu werden in den Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen Turbulenzmodelle verwendet (Truckenbrodt, 2008).

c) Turbulenzmodellierung: Durch Prandtl konnten mit der Grenzschichtgleichung unter Betrachtung des wandnahen Einflusses der Viskosität auf einen umströmten Körper (Mischungswegansatz) die Turbulenzmodellierung wesentlich vereinfacht werden (Schlichting und Gersten, 2006; Truckenbrodt, 2008). Neben einer Vielzahl angepasster Turbulenzmodelle als zusätzliche Randbedingungen werden häufig Turbulenzmodelle basierend auf der einer zusätzlichen Viskosität (Wirbelviskosität) zur Anwendung der RANS-Gleichungen (Gleichung 2.37) verwendet. Die Modelle unterscheiden sich in Null-, Ein- und Zweigleichungsmodellen. Zu den häufig verwendeten Turbulenzmodellen zur Modellierung der Reynolds-Spannungen zählt das (zweiparametrische) k - ε -Modell. Hierbei wird die Wirbelviskosität μ_t mit den Parametern k zur Beschreibung der kinetischen Energie und ε als Dissipationsrate der kinetischen Energie (k) beschrieben (Oertel et al., 2015). Pedras und Lemos, 2001 ermittelten die dimensionslose Konstante der Wirbelviskosität mit $c_\mu = 0,28$ unter Berücksichtigung der Porosität n und Grad der Turbulenz Re . Zur Simulation von Strömungen in Deckwerken mit hoher Turbulenz entwickelten Hsu et al (2002) die volumengemittelten Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (VRANS) unter Verwendung des k - ε -Turbulenzmodells. Die Energiedissipation ε kann ebenfalls mit $\omega = k/\varepsilon$ im k - ω -Turbulenzmodell beschrieben werden, welches in Wandnähe (bei hohen Gradienten) besonders geeignet ist. Eine weitere Optimierung kann durch die Kombination aus k - ε - und k - ω -Turbulenzmodellen im SST-Turbulenzmodell erreicht werden (Oertel et al., 2015).

2.3.2 Bodendynamische und geohydraulische Modellierung

Verschiedene numerische Modelle zur Simulation der Strömung in porösen Medien liegen vor, die sich durch die räumliche und zeitliche Betrachtungsweise, Skala sowie durch die Diskretisierung der Gleichungslösung unterscheiden. Neben Kontinuum-Modellen mit festen Nachbarschaftsbeziehungen gibt es Modelle mit diskreten Elementen (DEM) und netzfreie Methoden, wie Lattice-Boltzmann-Methode (LBM) und Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) (Lucy, 1977; Monaghan, 1988). Kontinuum-Modelle werden häufig basierend auf den Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (RANS) unter Anwendung von Turbulenzmodellen oder aber auch unter Berücksichtigung der (erweiterten) Darcy-Forchheimer-Gleichungen nach Polubarinova-Kochina (1962) verwendet.

Die Skalen der numerischen Modellierung von Strömungen in porösen Medien reichen von kleinen Skalen auf Größe einzelner Partikel oder des Porendurchmessers („Porenskala“) bis hin zu großen Skalen in der Betrachtung eines Bauwerks (Makroskala).

Partikelmodelle: Zu den Partikelmodellen zählen u.a. die Diskrete Elemente Methode (DEM) und die Lattice-Boltzmann-Methode (LBM) (Jakob und Konietzky, 2012; Pfletschinger-Pfaff, 2015). Zu den Vorteilen zählen die hohe Auflösung und die detaillierten Informationen zu geohydraulischen Prozessen, Porengeometrie, Spannungen zwischen den Körnern und Umlagerungsprozesse auf Mikroskala. Zu den Nachteilen zählen die hohe Rechenzeit der Simulationen und die Beschränkung auf eine geringe räumliche Ausdehnung. Eines der größten Schwierigkeiten der Partikelmodelle stellen die Implementierung der Randbedingungen und die Beeinflussung der Interpolationsmethoden durch die Partikelanordnung dar. Weiterhin erfordert weitgestuftes Material eine hohe Partikelanzahl mit unterschiedlichen Größen und Kornformen, die zu einer hohen Komplexität des Problems führen. Die Anwendung von Partikelmodellen auf die durchgeführten hydraulischen Versuche in der Wechseldurchströmungsanlage führen bei der Größenordnung von 10^9 Partikeln selbst bei Vereinfachungen, kugelförmigen Partikeln und bei der Verwendung eines modernen Hochleistungsclusters zu einer Rechenzeit von mehreren Wochen (Shire, 2014). Partikelmodelle und hybride Modelle werden derzeit noch erforscht und sind daher für die Anwendung auf systematische Parameterstudien zur Stabilität weitgestufter Filter noch nicht ausreichend erprobt (Zou, 2007; O'Sullivan, 2011; Shire, 2014; Barreiro, 2015; Canelas, 2015).

Netzfrie Modelle: „Smoothed Particle Hydrodynamics“ (SPH) (Gingold und Monaghan, 1977; Lucy, 1977), „Material Point Method“ (MPM) und „Free-Langrange Method“ sind Beispiele für netzfrie Methoden ohne feste bzw. mit variablen Nachbarschaftsbeziehungen (Bourantas und Loukopoulos, 2013; Zamzamian und Hashemi, 2015; Bandara und Soga, 2015; Wang et al., 2016). Diese Modelle eignen sich besonders für geotechnische Fragestellungen mit großer Verformung des Bodens und wurden auch für Porenwasserströmungen angewendet (Bandara und Soga, 2015).

Kontinuum-Modelle: Bei den Kontinuum-Modellen werden die Methoden der Finiten Differenzen (FDM), Finiten Elemente (FEM) und häufig der Finiten Volumen (FVM) verwendet. Im Gegensatz zu diskreten Elementen in der Mikroskala mit der Größe eines Einzelkorns und unter Berücksichtigung von Kornverteilungen wird beim Kontinuum-Modell ein Element oder (Kontroll-) Volumen verwendet, welches die Eigenschaften des porösen Mediums repräsentiert. Modelle mit dynamischen Gittern eignen sich besonders bei kleineren Verformungen mit geringer Geschwindigkeit im Vergleich zur Fluidgeschwindigkeit, wie sie unter Kontakterosion, Verdichtung und Verflüssigung bei dynamisch stabilen oder instabilen Kornfiltern zu erwarten sind (Crespo, 2008). Hierbei ist eine relativ geringe Rechenzeit von großer Bedeutung für die Machbarkeit systematischer Parameterstudien wie sie in diesem Vorhaben geplant sind. Für die Zielsetzung dieses Vorhabens zeigt sich besonders in Bezug auf Strömung in porösen Medien mit schnellen Druck- und Geschwindigkeitsänderungen die Eignung der Kontinuum-Modelle basierend auf den Navier-Stokes-Gleichungen (Lara, 2005; Barreiro et al., 2013; Foyer, 2013; Alcérreca Huerta, 2014; El Safti, 2015). Bezogen auf ein Kontrollvolumen in porösen Medien, werden die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen häufig mit der Finiten-Volumen-Methode (FVM) verwendet (VRANS Gleichungen) (Pedras und Lemos, 2001).

Im Vergleich numerischer Modelle zur Simulation der Strömung in porösen Medien ergeben sich jeweils folgende Vor- und Nachteile (Tabelle 2.5):

Tab. 2.5: Vergleich numerischer Modelle für Strömungen in porösen Medien mit Vor- und Nachteilen

	Vorteile	Nachteile
Kontinuum	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modellierung auf Meso- und Makroskala; ▪ Erfordert relativ geringe Rechenzeit bzw. geringe Rechenleistung; ▪ Umfangreiche Datengrundlagen zur Definition der Randbedingungen, Kalibrierung und Validierung der Modelle vorhanden 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abbildung des Materialtransports erfordert die Kopplung mit weiteren Modellen; ▪ Lokale mikroskalige Strömungsprozesse können nicht abgebildet werden
	FVM, FEM, FDM (Elsafti und Oumeraci, 2017; de-Pouplana und Oñate, 2017)	
Partikelmodelle	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mikroskalige Abbildung der Transportprozesse und der hydraulischen Prozesse; ▪ Erfassung der Spannungs-Dehnungsbeziehung und Änderungen der Porengeometrie 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erfordert hohe Rechenleistung/ -zeit; ▪ Einschränkung auf kleinskalige Probleme durch Anzahl der Partikel; ▪ Einschränkung der Kornverteilung und -form; ▪ Kopplung mit hydrodynamischem Modell; ▪ Daten zur Validierung der Korn-zu-Korn-Interaktion fehlen häufig
	CFD-DEM, DEM-LBM (Boutt et al., 2007; Jakob und Konietzky, 2012; Zhao und Shan, 2013; Han und Cundall, 2013; Shire, 2014)	
Netzfrie Methoden	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flexible und vielseitige Anwendungen; ▪ Simulation der mikroskaligen Strömungs- und Transportprozesse; ▪ Besondere Eignung für Mehrphasenströmung und komplexe Porengeometrien 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Begrenzt auf mikroskaligen Probleme durch hohe Rechenleistung bzw. -zeit; ▪ Daten zur Validierung der Korn-zu-Korn-Interaktion fehlen häufig; ▪ Einschränkungen durch Nachbarschaftsbeziehungen an Wänden und Schnittstellen
	SPH (Jiang et al., 2007; Holmes et al., 2011; Chen und Qiu, 2011)	

Die Simulation der Strömung in porösen Medien kann durch die Eulersche sowie Lagrange Betrachtungsweise und durch Betrachtung von einzelnen Partikeln oder Punkten der strömenden Phasen betrachtet werden. Diese Betrachtungsweisen können jeweils auf unterschiedlichen Skalen (Mikro-, Makro-, Mesoskala) stattfinden.

Partikelmodelle: In Hinblick auf Erosionsprozesse granularer Materialien zeigen sich große Vorteile der Partikelmodelle, da die Anordnung der einzelnen Bodenkörner zueinander, die Bewegungen der Körner und damit Erosionsprozesse in Mehrphasenströmungen abgebildet werden können. Dies ist jedoch mit einer extrem hohen Komplexität, Rechenzeit und weiteren Grundlagenuntersuchungen (zur Modellierung der Erosionsprozesse) verbunden.

Kontinuum-Modelle: Die Vorteile der Kontinuum-Modelle zeigen sich insbesondere bei Strömungen in porösen Medien ohne Transport der Bodenkörner. Es liegen umfangreiche Kenntnisse zu Strömungswiderstand, Turbulenzmodellierung, Konsolidierung und Stoffgesetzen vor, die eine gute Abbildung der Geschwindigkeits- und Porenwasserdruckverteilung in Filteraufbauten (Basis-/Filtermaterial) unter vertretbarem Rechenaufwand mit Kontinuum-Modellen ermöglichen. Die Betrachtung einer Porenwasserströmung in einem Filteraufbau kann in der Makroskala durch die (erweiterte) Forchheimer-Gleichungen simuliert werden. In Hinblick auf die Porenwasserdruckverteilung und die querschnittsgemittelte Filtergeschwindigkeit im hydraulischen Laborexperiment auf Makroskala ist ein Kontinuum-Modell besonders geeignet. Durch die Messdaten aus dem Labor wird eine Kalibrierung und Validierung des Modells ermöglicht, sodass die Ergebnisse der Laborexperimente durch numerische Parameterstudien erweitert werden können.

2.4 Präzisierung der Zielsetzung und Methodik

Die Zielsetzung und das methodische Vorgehen dieser Arbeit werden aufgrund der identifizierten Wissenslücken und weiterer Implikationen der Bewertung des Wissensstands in diesem Abschnitt präzisiert.

2.4.1 Wissenstand, offene Fragen und Einschränkungen

Vor dem Hintergrund der hydraulischen Bemessung von Kornfiltern in marinen Bauwerken ergeben sich folgende Hauptprozesse, die bei den geplanten Untersuchungen berücksichtigt werden müssen:

- Welleninduzierte freie Strömung
 - Bewegung fortschreitender windinduzierter Wellen
 - Welleninduzierte Strömungs- und Druckverteilung
 - Schwerpunkt: schichtorthogonale (oszillierende) Strömungskomponente
- Übergang zwischen freier Strömung und Strömung im porösen Medium
 - Welleninduzierter Porenwasserdruck
 - Welleninduzierte Strömungsgeschwindigkeit
- Strömung in den porösen Medien (Basis- und Filtermaterial)
 - Fließwiderstand
 - Kritischer hydraulischer Gradient der Kontakterosion
- Versagensmechanismen des Kornfilters
 - Kontakterosion (lokale Verflüssigung, Infiltration, Kolmation)
 - Innere Erosion (Suffosion, Suffusion)

Hydraulische Stabilitätskriterien für Kornfilter unter welleninduzierter Strömung wurden bisher nicht ausreichend erforscht. Insbesondere liegen noch keine hydraulischen Filterkriterien für horizontale Filteraufbauten vor, die die tatsächliche hydraulische Belastung durch Seegang (Wellenhöhe H und Wellenperiode T in Wassertiefe h) berücksichtigen. Während bereits Stabilitätskriterien basierend auf dem Shields-Konzept zu schichtparalleler Strömung an der Grenzfläche horizontal liegender Filterschichten vorliegen, bestehen weiterhin größere Wissenslücken zu schichtorthogonaler Durchströmung. In der Ingenieurpraxis werden daher vorwiegend geometrische Filterkriterien basierend auf den Untersuchungen von Terzaghi ohne Berücksichtigung der tatsächlichen hydraulischen Belastung angewendet. Dies führt unter Umständen zu geometrisch offenen Filtern, wodurch die Filterstabilität dennoch von der hydraulischen Belastung bestimmt wird. Im Fall eines geometrisch offenen Filters unter instationärer oszillierender Strömung tritt beim Erreichen einer kritischen hydraulischen Einwirkung das Versagen des Filters auf. Dies gilt umso mehr für oszillierende Strömung, bei der die Brückenbildung des Basismaterials im Porenraum des Filters ausbleibt. Hierbei ist die schichtorthogonale Strömungskomponente beziehungsweise der schichtorthogonale Druckgradient entscheidend für die Stabilität des Basismaterials an der Schichtgrenze zum Filter. Auf der anderen Seite können geometrische Filterkriterien bei einschichtigen Filteraufbauten mit groben Deckwerkselementen nicht erfüllt werden, sodass unwirtschaftliche mehrschichtige Filter erforderlich werden.

Weitere Wissenslücken zum dynamischen Verhalten des Filters bestehen hinsichtlich der Prozesse vom Bewegungsbeginn bis zum vollständigen Versagen des Filters. Hierzu liegen nur wenige Untersuchungen zur Beschreibung der zeitlichen Änderung der hydraulischen und geometrischen/geotechnischen Filtereigenschaften vor. Die Porenwasserdruckverteilung in Basis- und Filterschicht ist bisher nicht im Zusammenhang zwischen Materialeigenschaften und Wellenparametern beschrieben worden. Der Porenwasserdruck kann durch die Kopplung der bodenmechanischen Prozesse (durch die Stoffgesetze) mit dem Darcy-Gesetz (Gleichung 2.17) annähernd beschrieben werden. Es existieren bisher nur wenige

Ansätze zur Beschreibung des Porenwasserdrucks unter Verwendung der erweiterten Forchheimer-Gleichung (Abschnitt 2.2.2).

Diskrete-Element-Modelle (DEM) stellen eine optimale Methode zur numerischen Untersuchung von geohydrodynamischen Prozessen in Kornfiltern und Erosionsprozessen dar, da der Transport einzelner Körner und die Interaktion zwischen dem Basis- und Filtermaterial simuliert werden kann. Zur Anwendung der Diskrete-Element-Modelle besteht jedoch weiterer Forschungsbedarf zum Beispiel in Bezug auf die Kopplung dieser Modelle mit hydrodynamischen Modellen und zur Korn-zu-Korn-Interaktion (Abschnitt 2.3.2). In dieser Studie wird daher zur Untersuchung der geohydrodynamischen Prozesse ein Kontinuum-Modell angewendet. Diese Anwendung unterliegt dem Kompromiss, dass Erosions- und Transportprozesse (Suffosion, Kontakterosion) nicht berücksichtigt werden können, jedoch eignet sich das Modell zur Abbildung der geohydrodynamischen Prozesse im stabilen Zustand des Basis- und Filtermaterials und es besteht eine umfangreiche Datengrundlage zur Kalibrierung und Validierung des Modells (Abschnitt 4.1).

2.4.2 Zielsetzung

Im Gegensatz zur bislang wenig untersuchten Filterstabilität unter oszillierender Strömung, wie sie unter Wellenbelastung auftritt, liegen bereits viele Ansätze zur Beschreibung der geometrischen Filterstabilität von Kornfiltern unter stationärer gleichgerichteter Strömung vor. Es bestehen insbesondere Wissenslücken zu schichtorthogonaler oszillierender Strömung im Filteraufbau und der Kontakterosion zwischen Meeresgrund und der darüber liegenden horizontalen Filterschicht. Das Hauptziel dieser Arbeit ist daher, hydraulische Kriterien zu erarbeiten, die es ermöglichen die Filterstabilität in Abhängigkeit der Wellenbelastung (parametrisiert durch Wellenhöhe H , Wellenperiode T und Wassertiefe h) und der geometrischen Parameter des Basis- und Filtermaterials zu ermitteln. Diese physikalisch begründeten Bemessungsansätze sollen die Dimensionierung eines Kornfilters bei gegebenen hydraulischen Randbedingungen ermöglichen. Hierzu sind folgende Zwischenziele mit dem Fokus auf schichtorthogonale gleichgerichtete und oszillierende Strömungen erforderlich:

- (i) Beziehung zwischen Wellenparametern (Wellenhöhe H , Wellenperiode T in Wassertiefe h) und dem maßgebenden hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze (Basis-/Filtermaterial)
- (ii) Beziehung zwischen hydraulischen Gradienten und der Fließgeschwindigkeit (Filtergeschwindigkeit) im Basis- und Filtermaterial mit den Widerstandskoeffizienten der Forchheimer-Gleichung
- (iii) Definition der statischen und dynamischen Filterstabilität sowie Beziehung zwischen vertikaler Verformung der Filteroberkante und dem Stabilitätszustand des Filters (statische Stabilität, Bewegungsbeginn und Filterversagen)
- (iv) Kritische hydraulische Parameter aus der Beziehung zwischen dem maßgebenden hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze (Basis-/Filtermaterial) und Bewegungsbeginn beziehungsweise Filterversagen
- (v) Herleitung geometrischer und hydraulischer Stabilitätskriterien unter Berücksichtigung der Wellenparameter (Wellenhöhe H , Wellenperiode T), der Wassertiefe h und der geometrischen Eigenschaften des Filtermaterials (Korngrößenverteilung, Porosität, Lagerungsdichte, Filterauflast)

2.4.3 Methodik und Arbeitsprogramm

Aus der Analyse und Bewertung des Wissensstands haben sich Wissenslücken zu folgenden Punkten ergeben: (i) hydraulische Prozesse im Übergang zwischen freier Strömung und Strömung im porösen Medium, (ii) Fließwiderstand in porösen Medien sowie (iii) Funktionsweise und Stabilität des Kornfilters.

Aus den Wissenslücken zur Kontakterosion an einem horizontal geschichteten Kornfilter auf einem typischen sandigen Meeresgrund (siehe Abbildung 2.19) ergibt sich der Schwerpunkt dieser Arbeit mit der Untersuchung der durch den Wellendruck induzierten schichtorthogonalen Durchströmung des Basis- und Filtermaterials. Die Durchströmung wird hierzu durch Wellendruck nach linearer Wellentheorie erzeugt. Die betrachteten Erosionsprozesse beziehen sich hierbei auf die Kontakterosion, indem die Kontaktsuffosion zwischen Basis- und Filterschicht und die innere Erosion (Suffosion) im Filter inbegriffen sind. Das methodische Vorgehen der Untersuchungen der hydraulischen Prozesse im freien Wasser und der geohydraulischen Prozesse in porösen Medien wird in die in Abbildung 2.19 dargestellten Bereiche unterteilt:

- Welleninduzierte Orbitalströmung und Druckverteilung
- Wellendruck an der Sohle
- Wellendruck an der Filteroberkante
- Porenwasserdruckverteilung im Untergrund
- Porenwasserdruck an der Schichtgrenze (hydraulischer Gradient)

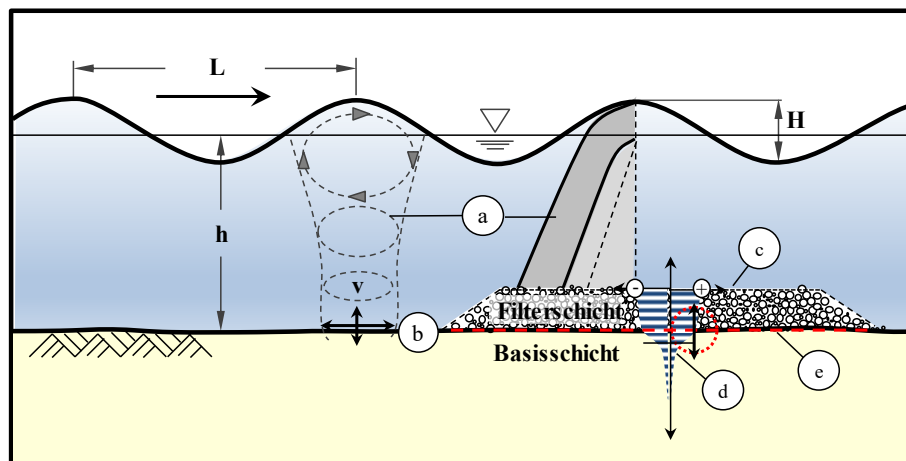


Abb. 2.19: Definitionsskizze der Untersuchungen dieser Arbeit mit a) welleninduzierte Orbitalströmung/Druckverteilung, b) Wellendruck an der Sohle, c) Wellendruck an der Filteroberkante, d) Porenwasserdruckverteilung im Untergrund, e) Porenwasserdruck an der Schichtgrenze (hydraulischer Gradient)

Die Verbesserung des Verständnisses zu hydraulischen und geohydraulischen Prozessen im Filteraufbau unter welleninduzierten Strömungen kann durch folgende Untersuchungen erzielt werden:

- i. *Laborexperimente* zur Untersuchung der Porenwasserdruckverteilung und der Filtergeschwindigkeit zur Beschreibung des Fließwiderstands im Filteraufbau mit der Darcy-Forchheimer-Gleichung, Ermittlung des Bewegungsbeginns und Beschreibung der Erosionsprozesse.
- ii. *Numerische Untersuchungen* der Porenwasserdruckverteilung als Funktion der Wellenparameter und der Materialeigenschaften des Filters zur Erweiterung der oben genannten Laborexperimente.
- iii. *Vergleichsanalyse* der Ergebnisse der oben genannten Laborexperimente und numerischen Untersuchungen mit vorhandenen Ansätzen zu den hydrodynamischen Prozessen und zur Filterstabilität.

Die Untersuchungen werden in vier Phasen wie folgt eingeteilt (siehe Abbildung 2.20):

- Phase 1: Analyse und Bewertung des Wissensstands
- Phase 2: Versuchsdurchführung mit der Wechseldurchströmungsanlage
- Phase 3: Numerische Modellierung der geohydraulischen Prozesse im Filteraufbau
- Phase 4: Analyse der Ergebnisse und Herleitung von Stabilitätskriterien

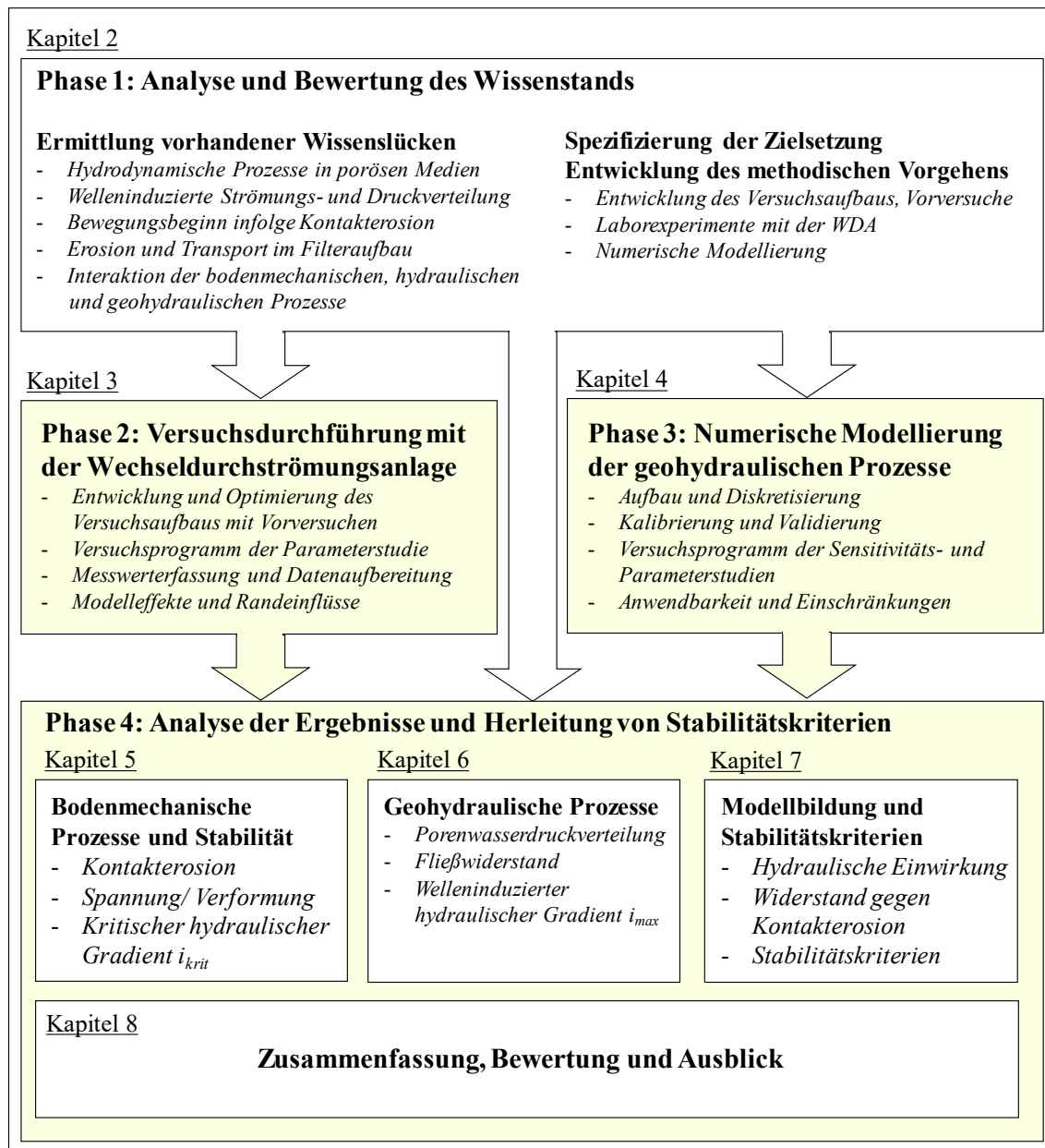


Abb. 2.20: Methodisches Vorgehen und Aufbau der Arbeit

Phase 1: Analyse und Bewertung des Wissensstands: In der ersten Phase der Untersuchungen erfolgte die Analyse des Schrifttums zur Identifizierung der relevanten hydrodynamischen und bodendynamischen Prozesse in einem Filteraufbau unter dem Einfluss welleninduzierter Strömungen (Kapitel 2). Weiterhin wurden Wissenslücken zu den Prozessen (i) welleninduzierte Strömungs- und Druckverteilung, (ii) Porenwasserdruckverteilung und hydraulischer Gradient in porösen Medien, (iii) Bewegungsbeginn durch Kontakterosion, (iv) Transportprozesse im Filteraufbau identifiziert.

Phase 2: Versuchsdurchführung mit der Wechseldurchströmungsanlage: Mit dem Ziel, die zuvor genannten Wissenslücken genauer zu untersuchen, wird die Entwicklung einer neuen Versuchszelle für die Wechseldurchströmungsanlage notwendig. Zur Entwicklung und Konstruktion einer Versuchszelle für hydraulische Laborexperimente wurde das Schrifttum zu Triaxial- und Filterversuchen analysiert. Hierbei lag der Fokus auf folgenden Punkten: (i) Optimierung der Anströmung, (ii) Steuerung der Auflast und Erfassung der vertikalen Verformung, (iii) Reduzierung von Wandeinflüssen, (iv) Erfassung der Porenwasserdrücke und der Filtergeschwindigkeit, (v) Optimierung der Versuchsdurchführung. Zur

Optimierung der Mess- und Regeltechnik der Versuchsanlage, der Versuchszelle und der Versuchsdurchführung werden Vorversuche durchgeführt. Hierdurch wird das Versuchsprogramm anhand der Systemgrenzen der Anlage optimiert. Der Schwerpunkt der Laboruntersuchungen mit der Wechseldurchströmungsanlage liegt in der schichtorthogonalen oszillierenden Strömung senkrecht zur Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial. Die Laborexperimente werden im Naturmaßstab mit Feinsand als Basismaterial und verschiedenen eng- bis weitgestuften Filtermaterialien (Sand-Kies-Gemische) unter welleninduziertem hydrodynamischem Druck durchgeführt. Siebanalysen der einzelnen Schichten im Filteraufbau liefern detaillierte Aussagen über die Prozesse Kontakterosion, Filtration und innerer Erosion (Suffosion). Aus den Laborexperimenten wird der kritische hydraulische Gradient ermittelt. Ebenfalls wird der Zustand der Filterstabilität klassifiziert, sodass in statische Stabilität, Bewegungsbeginn (semi-stabil) und Filterversagen (instabil) differenziert werden kann.

Phase 3: Numerische Modellierung der geohydraulischen Prozesse im Filteraufbau: Der Aufbau der Versuchszelle in der Wechseldurchströmungsanlage wird in das numerische Modell *geotechFoam* überführt. Hierzu werden die Randbedingungen nach linearer Wellentheorie implementiert sowie eine Kalibrierung des Fließwiderstands durchgeführt. Anschließend erfolgt eine Validierung des Modells anhand der Porenwasserdruckverteilungen aus den Laborexperimenten. Mit Hilfe des validierten Modells werden Modelleffekte und Einflussgrößen in Sensitivitäts- und Parameterstudien untersucht, um den Zusammenhang zwischen der welleninduzierten Einwirkung und dem maßgebenden hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze zu beschreiben.

Phase 4: Analyse der Ergebnisse und Herleitung von Stabilitätskriterien: Die empirischen Stabilitätsparameter der Laborexperimente werden mit den Ergebnissen der numerischen Parameterstudie zur hydraulischen Einwirkung verknüpft, erweitert und analysiert. Hieraus werden der maßgebende hydraulische Gradient als Funktion der Wellenparameter (Wellenhöhe H und Wellenperiode T in Wassertiefe h) sowie des kritischen hydraulischen Gradienten als Funktion der geotechnischen Eigenschaften (Porosität und charakteristischer Korngrößen des Basis- und Filtermaterials) beschrieben. Die experimentellen, numerischen und theoretischen Ergebnisse werden zur Verbesserung des Prozessverständnisses und zur Herleitung von Stabilitätskriterien zur Bemessung von Kornfiltern unter welleninduzierter Strömung genutzt:

- Bodenmechanische Prozesse, Erosionsprozesse sowie Ermittlung der kritischen hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial (Kapitel 5)
- Interaktion zwischen der Einwirkung aus welleninduzierter Strömung und dem hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial (Kapitel 6)
- Modellbildung und Herleitung von Stabilitätskriterien (Kapitel 7)

3 Laboruntersuchungen mit der Wechseldurchströmungsanlage

Das Ziel der Laboruntersuchungen liegt in (i) der Verbesserung des Verständnisses der hydraulischen und geohydraulischen Prozesse in Kornfiltern, (ii) der Ermittlung der kritischen hydraulischen Parameter für Kornfilter und (iii) der Beschreibung der Filterstabilität. In diesem Kapitel werden die Entwicklung, Konstruktion und Optimierung des Versuchsaufbaus sowie die Voruntersuchungen und die Versuchsdurchführung der Laborexperimente beschrieben. Durch die Analyse des Schrifttums wurden die Einschränkungen und Wissenslücken des Wissensstands identifiziert und in Abschnitt 2.4 präzisiert. Vor dem Hintergrund dieser Einschränkungen wird ein spezieller Entwurf des Versuchsaufbaus und der Instrumentierung erforderlich (Abb. 3.1). In den folgenden Abschnitten erfolgt hierzu die Beschreibung folgender Punkte: (i) Modellaufbau und Messkonzept, (ii) Versuchsprogramm und -durchführung, (iii) Datenaufbereitung, (iv) Berücksichtigung von Modelleffekten und Randeinflüssen und (v) Korrelations- und Regressionsanalyse.



Abb. 3.1: Wechseldurchströmungsanlage mit Versuchszelle (modifiziert nach Kayser et al., 2016), a) Versuchszelle mit Filterprobe, b) Steuerstand und Messdatenerfassung, c) Drucktank untere Randbedingung, d) Drucktank obere Randbedingung, e) Durchflussmessung untere Randbedingung, f) Durchflussmessung obere Randbedingung

Eine detaillierte Beschreibung der Konstruktion und Messtechnik der Versuchszelle sowie die Optimierung der Anlagensteuerung und des Versuchsprogramms sind in Schürenkamp und Oumeraci, 2015 dargestellt. Der Aufbau und die Funktionsweise der Versuchsanlage werden ausführlich in Kayser et al., 2016 beschrieben.

3.1 Modellaufbau und Messkonzept

Basierend auf den Untersuchungen von Köhler (1993) und Moffat (2005) wurde eine neue Versuchsanlage konzeptioniert und aufgebaut. Aus den bisherigen Untersuchungen ergeben sich folgende Anforderungen an die Anlage (i) präzise Steuerung von schiffsinduzierten und welleninduzierten Druckverläufen, (ii) Erzeugung eines Druckniveaus bis 10 bar (Absolutdruck), (iii) Erfassung und Steuerung des Durchflusses in verschiedenen Messbereichen in Abhängigkeit der Probendurchlässigkeit und (iv) flexibler Einsatz verschiedener Versuchszellen (Kayser et al., 2016).

3.1.1 Wechseldurchströmungsanlage

Die Wechseldurchströmungsanlage besteht aus zwei Drucktanks, in denen über ein Druckluftsystem mit Hilfe einer Membran der Wasserdruck im Rohrsystem erzeugt werden kann (Abbildung 3.2). Die Druckluft wird mit einem Kompressor erzeugt, über einen Kältetrockner aufbereitet und in einem Vordruckbehälter zwischengespeichert. Die Drucktanks sind über ein verzweigtes Rohrsystem mit der Versuchszelle verbunden. Es stehen Rohrleitungen unterschiedlicher Durchmesser im Bereich von DN15 bis maximal DN50 zur Verfügung, sodass ein geeigneter Querschnitt, in Abhängigkeit der Durchlässigkeit der Probe, über Schieber gewählt werden kann (siehe Abbildung 3.2). Zusätzlich sind die beiden Drucktanks über eine Umgehungsleitung (Bypass) verbunden, um das Wasservolumen zwischen den beiden Behältern bei Bedarf auszugleichen (Kayser et al., 2016).

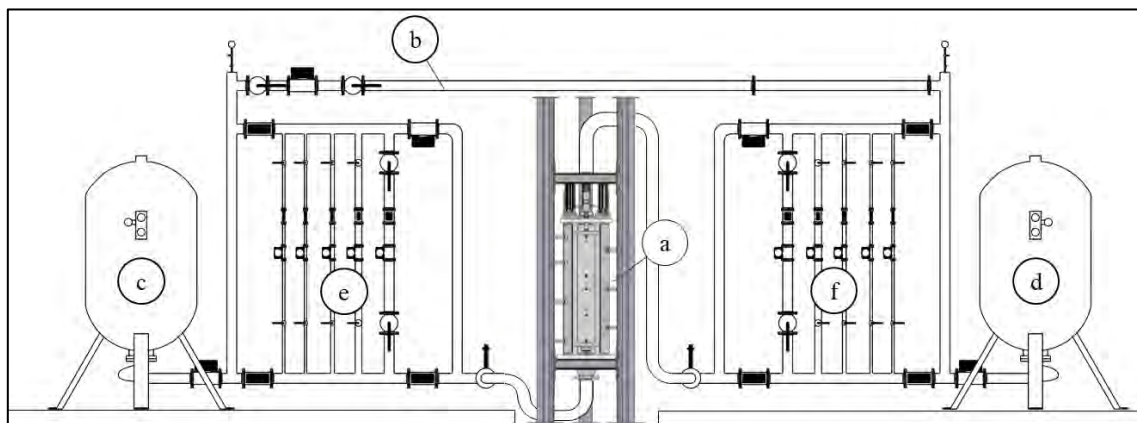


Abb. 3.2: Systemskizze der Wechseldurchströmungsanlage (modifiziert nach Kayser, 2013), a) Versuchszelle mit Tragrahmen, b) Umgehungsleitung (Bypass) zum Volumenausgleich, c) unterer Drucktank (links), d) oberer Drucktank (rechts), e) untere Durchflussmessung (links), f) obere Durchflussmessung (rechts)

Die Steuerung der Anlage erfolgt über einen zentralen Rechner mit einer speziellen Steuerungssoftware. Zur Steuerung des gewünschten Druckverlaufs wird ein Präzisionsdruckregler verwendet, um die Druckluft über eine Membran im Drucktank auf das Wasser im geschlossenen Rohrleitungssystem zu übertragen (Kayser et al., 2016).

3.1.2 Versuchszelle und Messtechnik

Bisherige experimentelle Untersuchungen zur Stabilität von Filtern unterliegen Einschränkungen hinsichtlich der Erfassung von Filtergeschwindigkeit, Porenwasserdruck, Spannungen, Verformungen und Materialbewegung (wie in Abschnitt 2.1 dargestellt). Zur genaueren Erfassung der hydrodynamischen und bodendynamischen Prozesse werden die Anforderungen und die dazu erforderlichen technischen Lösungen für die Laborexperimente in Tabelle 3.1 aufgestellt.

Tab. 3.1: Anforderungen an den Versuchsaufbau und technische Lösungen

Anforderung	Technische Lösung
Steuerung der Auflast in einem Bereich von 5 kN/m ² bis 30 kN/m ²	Lastaufbringung durch Pneumatiksystem mit Druckplatte zur Einstellung der Filterauflast (unter Berücksichtigung von Auftrieb und Innendruck der Zelle)
Messung der vertikalen Verformung des Filters synchron zu Druck u. Durchfluss	Wegmesssystem zur Messung der vertikalen Verformung an der Oberkante des Filters
Messung der effektiven Auflast unterhalb der Filterprobe zur Berücksichtigung der Wand-einflüsse (Wandreibung)	Kraftmesszelle mit einer Druckplatte unterhalb der Probe zur Erfassung der Vertikalkraft
Messung des Porenwasserdrucks zur Ermittlung der Druckverteilung und der hydraulischen Gradienten	Anordnung von Druckmesszellen mit hoher Messgenauigkeit in einem 10 cm Raster zur Messung des Drucks innerhalb der Probe mit Entlüftungsventilen
Messung der Fließgeschwindigkeit und Ermittlung des spezifischen Durchflusses	Anordnung von Durchflussmesseinrichtungen an den Zuläufen der Versuchszelle (der Messbereich wird an die Durchlässigkeit der Probe angepasst)
Beobachtung der Materialbewegung und der Verformung der Probe durch Setzung, Sackung und Verdichtung mit Videoaufzeichnung	Die optische Beobachtung erfordert eine transparente Versuchszelle mit Maßeinteilung und hochauflösende Videoaufzeichnung
Untersuchung von weitgestuften Filtermaterialien mit ausreichender Schichtdicke	Dimensionierung des Zelleninnendurchmessers von $d_z = 328$ mm für das Größtkorn 31,5 mm und Wahl einer effektiven Zellhöhe von $h_z = 800$ mm

Bei der Entwicklung der neuen Versuchszelle sind die Erfahrungen aus den Versuchsaufbauten nach de Graauw et al. (1983), Köhler (1993) und Moffat (2005) berücksichtigt worden. Hieraus haben sich folgende Optimierungen der Versuchszelle ergeben:

- Die Auflast lässt sich im Gegensatz zu den bisherigen Untersuchungen stufenlos über den gesamten Untersuchungsbereich regeln.
- Die Messung des Drucks erfolgt nicht an der Wandung, sondern direkt innerhalb der Probe über kurze Filterröhrchen mit Absolutdrucksensoren, die in der Wandung eingeschraubt sind. Dieses System lässt sich entlüften, sodass eine systembedingte Druckdämpfung reduziert wird.
- Der Einfluss der Wandreibung kann über die Kraftmessung unterhalb der Probe ermittelt werden. Dieser Aufbau wurde für einen großen Fließquerschnitt im Zulauf der Zelle gegenüber dem Aufbau nach Moffat (2005) optimiert.
- Die Druckdichtigkeit des gesamten Aufbaus ist bis zu 6 bar Wasserdruck gegeben.

Aus den Anforderungen in Tab. 3.1 sind technische Lösungen entwickelt worden. Zur präzisen Messung der einzelnen Parameter bei gleichzeitiger Druckdichtigkeit und unter Beachtung von Wandeeinflüssen wurden die einzelnen Bauteile des Versuchsaufbaus konstruiert. In den folgenden Abschnitten wird der Versuchsaufbau mit der Wechseldurchströmungsanlage und der zugehörigen Versuchszelle erläutert. Hierzu wird der gesamte Aufbau mit den technischen Daten sowie mit der Mess- und Regeltechnik beschrieben.

Die Versuchszelle besteht aus drei Teilen: (i) transparentes Acrylglasrohr mit Aufnahme der Drucksensoren (Abbildung 3.3 a) und b)), (ii) unterer Zulauf mit Kraftmessung über eine Lochplatte (Abbildung 3.3 c)) und (iii) oberer Zulauf mit Auflaststeuerung und Wegmesssystem an einer Lochplatte (Abbildung 3.3 d)).

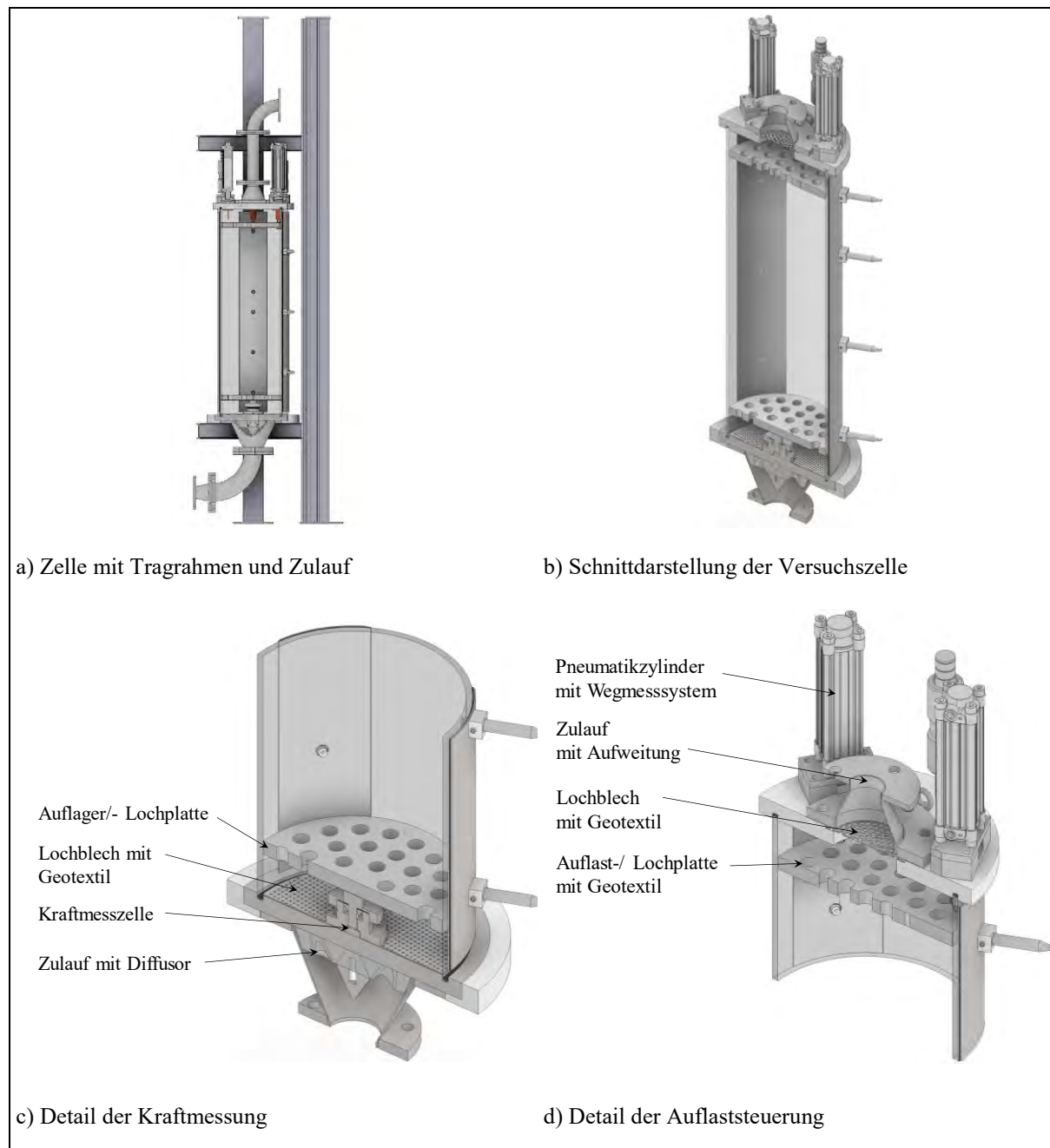


Abb. 3.3: Schnittdarstellungen und Details der Versuchszelle mit a) Zelle mit Tragrahmen und Zulauf, b) Schnittdarstellung der Versuchszelle, c) Detail der Kraftmessung, d) Detail der Auflaststeuerung

Die neue Versuchszelle ist für den Einsatz in der Wechsele durchströmungsanlage sowie für die Fragestellung des Bewegungsbeginns unter oszillierender und gleichgerichteter Strömung optimiert. Das Zusammenspiel der Regeltechnik für den Druckverlauf und die Auflast mit der Messtechnik für Druck, Durchfluss, Kraft und Weg erfordert Vorversuche unter kontrollierten Bedingungen. Um den Einfluss der Materialumlagerungen in der Probe zu reduzieren eignen sich gleichverteilte Glaskugeln mit einer hohen Auflast zur Verspannung der Probe.

3.1.3 Voruntersuchungen und Optimierung der Versuchsanlage

Die Wechseldurchströmungsanlage und die neue Versuchszelle werden erstmalig für diese Studie in Betrieb genommen und es bedarf daher einer ausführlichen Funktionsprüfung, Optimierung und Validierung der Mess- und Regeltechnik. Es werden umfangreiche Voruntersuchungen zu folgender Mess- und Regeltechnik durchgeführt:

- Druckregelung der Versuchsanlage zur Simulation eines Druckverlaufs an der Meeressohle unter fortschreitenden regelmäßigen Wellen unter Berücksichtigung der Systemgrenzen
- Optimierung der Druckmessung in der Bodenprobe mit Filterröhrchen und Entlüftungseinrichtung
- Auflastregelung und Verformungsmessung unter Berücksichtigung der reibungsarmen Führung und der Druckdichtigkeit

a) Regelung des Drucks: Der gesamte Aufbau wird in der Interaktion mit einer Probe geprüft. Hierbei werden Glaskugeln mit gleichförmiger Verteilung der Korngrößen von $d = 1,7 \text{ mm}$ bis $2,1 \text{ mm}$ verwendet. Durch die relativ hohe Durchlässigkeit der Kugelpackung im Vergleich zu einer Kombination aus Basismaterial (Sand) und den zu untersuchenden Filtermaterialien (Kies) können die Obergrenzen der Versuchsanlage getestet werden. Folgende Parameter wurden genauer untersucht:

- Maximaler Durchfluss q : begrenzt durch die Regeltechnik auf $q = 10 \text{ l/s}$
- Maximale Druckhöhe p : begrenzt durch den Kompressor auf $p = 10 \text{ bar}$
- Maximale Druckamplitude in Abhängigkeit des mittleren Drucks: $a = 0,56 \text{ bar}$ (bei 25 mWS)
- Maximaler Druckgradient in Abhängigkeit des Anfangsdrucks: $\Delta p/\Delta t = 0,5 \text{ bar/s}$ (bei 25 mWS)

Aus den Vorversuchen zeigt sich, dass durch die Druckregelung der Druckverlauf oberhalb der Probe gemäß der linearen Wellentheorie sehr gut abgebildet werden kann. Damit kann ein welleninduzierter Druckverlauf mit einer Wellenperiode von $T > 2,0 \text{ s}$, einer Wellensteilheit von bis zu $H/L \leq 0,142$ und ein Brecherindex $H/h \leq 0,780$ bei einer äquivalenten Wassertiefe von $h = 25 \text{ m}$ erreicht werden. Bei geringen Druckhöhen ist die Wellenamplitude durch die geringe Druckdifferenz zwischen dem Innendruck der Anlage und dem äußeren atmosphärischen Druck begrenzt. Der maximale Druck der Anlage mit $p_{\max} = 10 \text{ bar}$ begrenzt den mittleren Druck und die Wellenamplitude im oberen Bereich. Das Versuchsprogramm wird daher für drei Wasserstände mit 5 m , 25 m und 45 m ausgelegt, sodass die maximale Wellensteilheit H/L und der maximale Brecherindex H/h mit Wellenperioden im Bereich von $2,0 \text{ s} \leq T \leq 12,5 \text{ s}$ erreicht werden können. Höhere Wellenperioden können erzeugt werden, aber die maximale Wellensteilheit kann dann aufgrund der begrenzten Druckamplitude nicht mehr erreicht werden.

b) Druckmessung innerhalb der Probe: Die Druckmessung in der Probe erfolgt über in die Versuchszelle eingeschraubte Drucksensoren mit Filterröhrchen (Abbildung 3.4). Der Druckverlauf kann somit über die Probenhöhe von der Oberkante bei $z = +40 \text{ cm}$ bis zur Unterkante bei $z = -40 \text{ cm}$ in 9 Höhenlagen mit Abständen von 10 cm erfasst werden (Abbildung 3.4 b)). Vergleichsmessungen zwischen Drucksensoren in gleicher Höhenlage haben gezeigt, dass es keinen messbaren Einfluss der Filterröhrchen gibt und dass eine Entlüftung des Messsystems über Ventile möglich ist (Abbildung 3.4 c)).

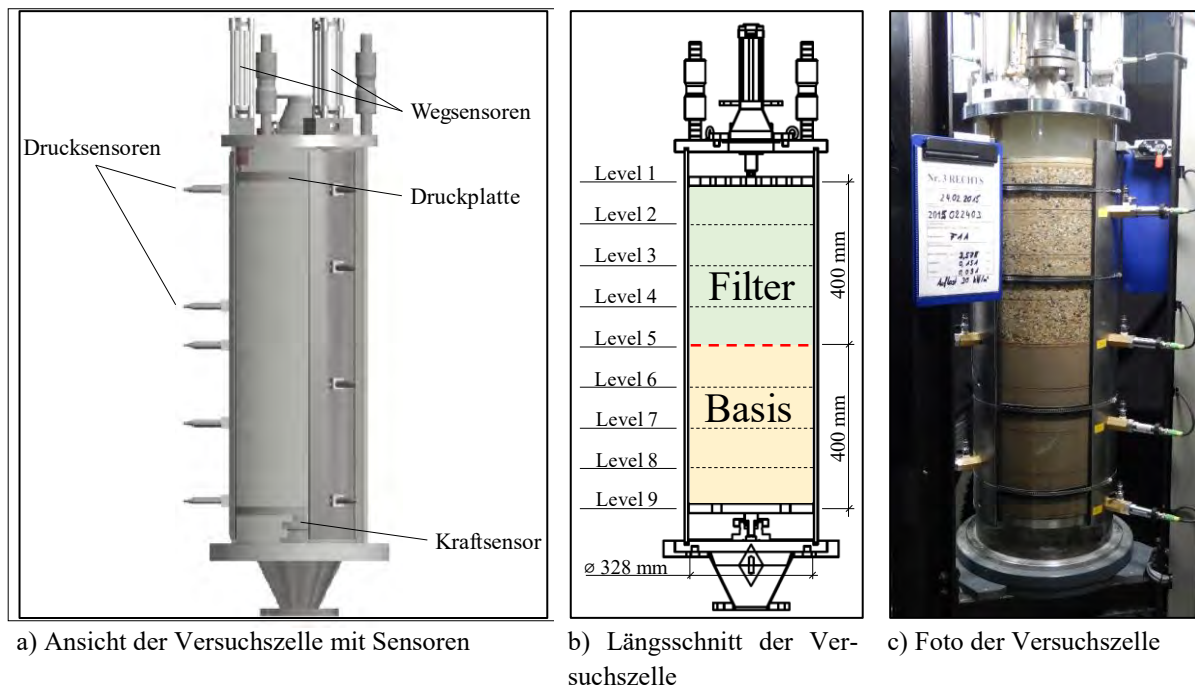


Abb. 3.4: Ansicht und Längsschnitt der Versuchszelle mit Messeinrichtungen und Abmessungen

Der Aufbau der Versuchszelle mit den Messeinrichtungen ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Neben der Druckmessung innerhalb des Basis- und Filtermaterials wird die geregelte Auflast, die Kraft an der Unterkante der Probe und die vertikale Verformung erfasst.

c) Regelung der Auflast und Verformungsmessung: Die Regelung der Auflast ist erforderlich, um die effektiven Spannungen im Filter unter der Auflast einer Deckschicht zu erreichen. Hierzu wird die Flächenlast unter Berücksichtigung des Auftriebs ermittelt. Für das Auflastsystem wird ein Druckregler verwendet, der den Luftdruck in den Pneumatikzylindern in Abhängigkeit des Innendrucks der Zelle regelt. Somit wird gewährleistet, dass die Filterauflast der tatsächlichen Last eines aufliegenden Deckwerks oder einer weiteren Filterschicht entspricht.

3.1.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung für die Versuchsdurchführung

Zur Untersuchung der Stabilität von Kornfiltern unter welleninduzierten Porenwasserdrücken ist eine neue Versuchszelle speziell für die Wechseldurchströmungsanlage entwickelt worden. Die Wechselwirkungen der Regeltechnik zwischen Versuchsanlage und Versuchszelle wurden in Vorversuchen untersucht, sodass eine Optimierung der Regeltechnik in folgenden Punkten erreicht wurde:

- Der Druckverlauf kann nach linearer Wellentheorie als obere und untere Randbedingung der Probe in folgenden Bereichen geregelt werden:
 - Wassertiefen von $5 \text{ m} \leq h \leq 45 \text{ m}$
 - Wellenperiode $2,0 \text{ s} \leq T \leq 12,5 \text{ s}$
 - Wellensteilheit $H/L \leq 0,142$ (Grenzwellensteilheit)
 - Brecherindex $H/h \leq 0,780$ (Breckriterium)
- Die Druckmessung erfolgt in 9 Ebenen mit jeweils 10 cm Abstand in der Mitte der Probe, sodass Wandeinflüsse reduziert werden.
- Eine redundante Messung an der Filteroberkante, Schichtgrenze und Basisunterkante ermöglicht weitere Vergleiche der Druckmessung.
- Die Entlüftung der Drucksensoren und Filterröhrchen erfolgt über Ventile.
- Die Auflastregelung erfolgt unter Berücksichtigung der Flächenlast unter Auftrieb und des Innendrucks der Versuchszelle, sodass eine konstante Auflast einer aufliegenden Deckschicht simuliert wird.

Durch die neue Versuchsanlage und der dafür entwickelten Versuchszelle können die bisherigen Untersuchungen in weitaus größeren Dimensionen durchgeführt werden. In Vorversuchen wurden die Systemgrenzen der Anlage für die zu untersuchenden Materialien ermittelt. Die Versuchsdurchführung und das Versuchsprogramm wurden in Hinblick auf eine schrittweise Steigerung der hydraulischen Belastung durch die Ergebnisse der Vorversuche optimiert. Aus dem Zusammenhang zwischen den Wellenparametern (Wellensteilheit H/L und Brecherindex H/h) und dem hydraulischen Gradienten i wurde die hydraulische Belastung im Versuchsprogramm in aufsteigender Reihenfolge festgelegt.

Weiterhin konnten die Wand- und Randeinflüsse der Versuchszelle durch die Konstruktion der Zelle zusammen mit der Wahl der geeigneten Filtermaterialien reduziert werden. Hierdurch wird es möglich die Stabilität weitgestufter Filter unter extremen hydraulischen Belastungen zu untersuchen. Insgesamt sieben Filterkonfigurationen werden einem umfangreichen Versuchsprogramm in der Wechseldurchströmungsanlage unterzogen.

3.2 Versuchsprogramm und -durchführung

Aus den Erfahrungen der Vorversuche werden unter Einhaltung der technischen Systemgrenzen der Versuchsanlage die Parameter in dem Versuchsprogramm festgelegt. Insgesamt werden vier Filterkonfigurationen untersucht, wobei für zwei Filterkonfigurationen Wiederholungsversuche durchgeführt werden. Das Hauptversuchsprogramm beinhaltet eine konstante Auflast ($p_A = 30 \text{ kN/m}^2$) bei einer konstanten Wassertiefe ($h = 25 \text{ m}$). Im Versuchsprogramm werden Wellenhöhe H und Wellenperiode T so variiert, dass Wellensteilheiten im Bereich von $H/L = 0,022$ bis $0,149$ erreicht werden (siehe äquivalente Wellenparameter in Abschnitt 3.3.1).

3.2.1 Hydraulische Parameter

Aus der Analyse des Schrifttums ergibt sich der Schwerpunkt der Laborexperimente mit schichtorthogonaler, oszillierender Strömung sowie dem Vergleich zwischen gleichgerichteter und oszillierender Strömung (Abbildung 3.5). Die vertikale oszillierende Durchströmung der Probe wird durch den Wellendruck nach linearer Wellentheorie mit einer regelmäßigen Druckamplitude erzeugt.

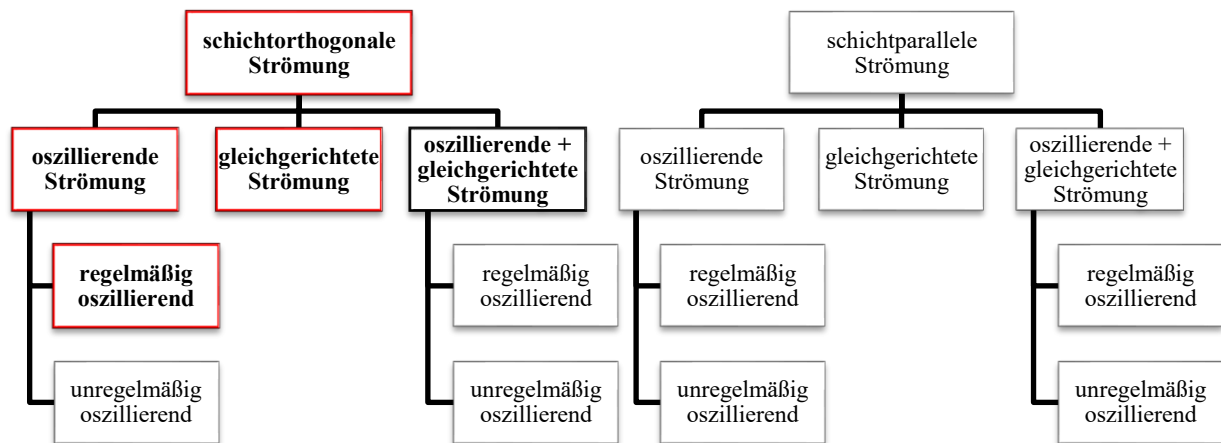


Abb. 3.5: Hauptkomponenten der Strömungen in Kornfiltern (rot: durch Laborexperimente untersuchte Strömungskomponenten)

Im Gegensatz zur Wellengenerierung in einem Wellenkanal mit freier Wasseroberfläche wird im geschlossenen System der Wechseldurchströmungsanlage der Wasserdruck eingesteuert. Dies erfordert eine vorherige Ermittlung des Wasserdrucks in Abhängigkeit der Wellenparameter nach Dean und Dalrymple (1991). Die Randbedingungen werden in der Versuchsanlage anhand des äquivalenten Wellendrucks anstatt der vertikalen Strömungskomponente w (nach linearer Wellentheorie) geregelt. Mit den Wellenparametern H und T sowie der Wassertiefe h werden folgende Parameter zur Steuerung der Anlage ermittelt:

- Hydrostatischer Druck (Mittelwert) p_{stat} in bar (in Abhängigkeit der Wassertiefe h)
- Hydrodynamische Druckamplitude a in bar
(in Abhängigkeit der Wellenhöhe H , Wellenperiode T und Wassertiefe h)
- Frequenz der Druckamplitude f in s^{-1} (in Abhängigkeit der Wellenperiode T)

Diese Parameter werden aus den Wellenparametern in Abhängigkeit der lokalen Wassertiefe h ermittelt. Die Wahl der maßgebenden Wassertiefen erfolgt in Bezug auf die Fragestellung zu üblichen Wassertiefen für Sohlsicherungen im Küsten- und Offshore-Bereich mit 5 m, 25 m und 45 m. Weiterhin werden die technischen Grenzen der Versuchsanlage und der Versuchszelle mit einem Maximaldruck von 6 bar

berücksichtigt. Zu diesen Wassertiefen werden die maximalen Wellenhöhen mit dem Brechkriterium $H/d = 0,78$ ermittelt (siehe Abschnitt 2.2.1). Nach Miche, 1944 wird durch Iteration die Wellenlänge L und daraus die Wellenperiode T beziehungsweise die Wellenfrequenz f (als Kehrwert der Periode) ermittelt. Mit Gleichung 2.15 wird der hydrostatische und hydrodynamische Druckanteil an der Sohle ($z = -h$) ermittelt. Der Mittelwert p_{stat} (hydrostatischer Druck) und Druckamplitude a (hydrodynamischer Druck) werden in der Anlagensteuerung verwendet. Dieses Vorgehen ist schematisch in Abbildung 3.6 dargestellt.

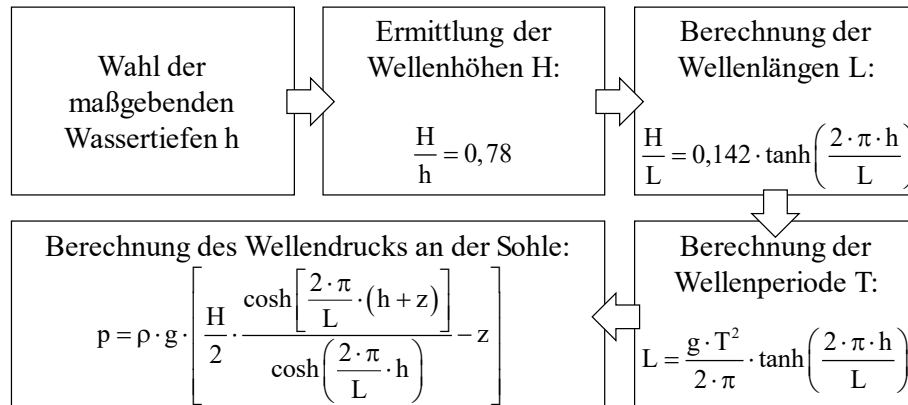


Abb. 3.6: Schematische Darstellung des Vorgehens zur Ermittlung des hydrostatischen und hydrodynamischen Druckanteils zur Steuerung der Versuchsanlage

Die Berechnung des maximalen Wellendrucks $p_{\text{max}(z)}$ in der Tiefe z erfolgt nach Gleichung 3.1:

$$p_{\text{max}(z)} = \rho \cdot g \cdot \left[\frac{H}{2} \cdot \frac{\cosh\left[\frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot (h + z)\right]}{\cosh\left(\frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot h\right)} - z \right] \quad (3.1)$$

mit:

- $p_{\text{max}(z)}$: Maximaler Wellendruck an der Position z in N/m^2
- ρ : Rohdichte des Wassers in kg/m^3
- g : Erdbeschleunigung in m/s^2
- H : Wellenhöhe in m
- L : Wellenlänge in m
- h : Wassertiefe in m
- z : Tiefe in m

Der Vergleich zwischen dem geregelten und dem gemessenen Druckverlauf sowie die Ermittlung der äquivalenten Wellenparameter H_{eq} , T_{eq} und h_{eq} sind in Abschnitt 3.3 dargestellt. Das Versuchsprogramm besteht aus den Hauptversuchen für jede Filterkonfiguration mit gleicher Filterauflast $p_A = 30 \text{ kN/m}^2$ und Wassertiefe $h = 25 \text{ m}$. Dazu werden zusätzliche Versuche mit geringerer Filterauflast ($p_A = 5 \text{ kN/m}^2$ und 15 kN/m^2) in den Wassertiefen $h = 5 \text{ m}$ und 45 m durchgeführt. Das Versuchsprogramm der Hauptversuche ist mit den (äquivalenten) Wellenparametern (Wellenhöhe H , Wellenperiode T und Wellensteilheit H/L) in Tabelle 3.1 dargestellt. Das Versuchsprogramm wird aufgestellt, um folgende Anforderungen zu erfüllen:

Die Gesamtdauer von 1200 s wird aus der Erfahrung der Vorversuche als ausreichend und geeignet für alle Versuche festgelegt. Somit werden in den Versuchen in Abhängigkeit der Wellenperiode ($T = 7,2$ s bis $12,5$ s) 96 bis 167 Wellenzyklen erzeugt.

3.2.2 Parameter des Basis- und Filtermaterials

Basismaterial: Als Basismaterial wird für alle Versuche ein typisches marines Sediment nach Streif, 1990 mit einem Mittelsand (mS, fs') verwendet. Die Kornverteilung des Basismaterials ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Der mittlere Korndurchmesser beträgt $d_{50B} = 0,252$ mm und die Ungleichförmigkeit $U_B = 1,292$.

Filtermaterial: Das Filtermaterial wird anhand des Abstandsverhältnisses, der Durchlässigkeit und der Ungleichförmigkeit dimensioniert. Hierbei wurde beachtet, dass das Größtkorn $d_{100} = 31,5$ mm maximal einem Zehntel des Zellendurchmessers $d_{Zelle} = 328$ mm beträgt, um Randeinflüsse (durch Umströmen der Probe) zu reduzieren. Die Kornverteilungen der ausgewählten Filtermaterialien sind in Abbildung 3.7 zum Anfangszustand dargestellt.

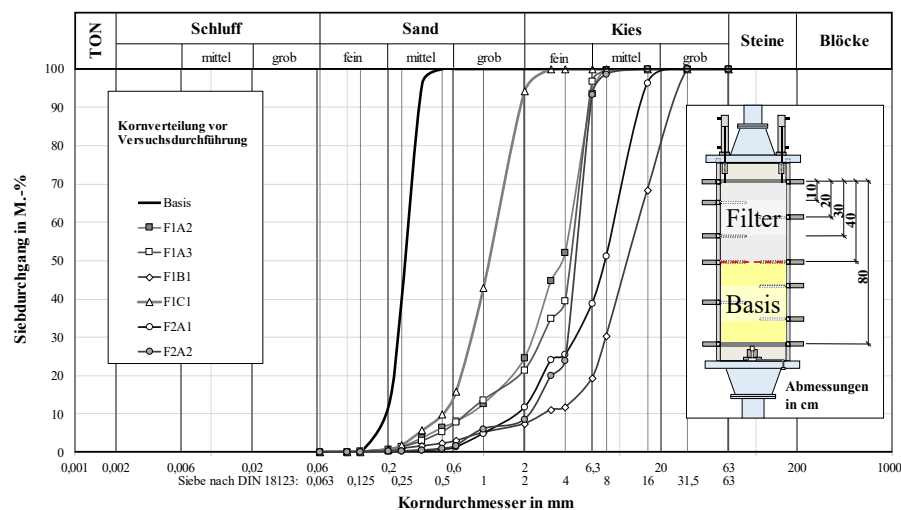


Abb. 3.7: Kornverteilungen der Filtermaterialien im Anfangszustand vor Versuchsdurchführung

Die Auswahl der zu untersuchenden Filtermaterialien wird nach folgenden Kriterien getroffen:

- (i) *Abstandsverhältnis* $d_{15F}/d_{85B} = 2,3$ bis 20 ; d.h. von potentiell geometrisch geschlossen bis geometrisch offen
- (ii) *Ungleichförmigkeit* $U = 2$ bis 10 ; d.h. von eng- bis weitgestuftem Filter
- (iii) *Filterdurchlässigkeit in Abhängigkeit von d_{10F}* mit $d_{10F} = 0,5$ mm bis $2,5$ mm; d.h. von $k_f = 3,5 \cdot 10^{-3}$ m/s bis $5,1 \cdot 10^{-2}$ m/s (nach Hazen).

Hierbei werden zum Vergleich folgende Filtermaterialien (F) gewählt: a) mit ähnlicher Ungleichförmigkeit aber unterschiedlichen Abstandsverhältnissen sowie b) mit ähnlichen Abstandsverhältnissen aber unterschiedlicher Ungleichförmigkeit, sodass vier Hauptgruppen vorliegen: F1A, F1B, F1C und F2A. Diesen Hauptgruppen sind einzelne oder mehrere Filterkonfigurationen mit fortlaufender Nummerierung zugeordnet (z. B. F1A1, F1A2) welche ähnliche Abstandsverhältnisse, Ungleichförmigkeiten und Durchlässigkeiten aufweisen. Die Hauptgruppen sind wie folgt charakterisiert (siehe auch Tabelle 3.3):

- F1A: Bemessen nach Terzaghi bzw. CEM, 2008 mit: $d_{15F}/d_{85B} = 4,3$ bis $4,5$; $U = 5,9$ bis $6,6$
- F1B: Ähnliche Ungleichförmigkeit ($U = 5,5$) zu F1A aber mit sehr hohem Abstandsverhältnis von $d_{15F}/d_{85B} = 19,9$
- F1C: Bemessen nach de Graauw et al., 1983 mit: $d_{15F}/d_{85B} = 2,3$; $U \approx 2,3$
- F2A: Hohes Abstandsverhältnis $d_{15F}/d_{85B} = 8,3$ bis $9,9$ bei mäßiger Ungleichförmigkeit $U = 2,5$ bis $4,8$

Einige Filter wurden in Wiederholungs- und Ergänzungsversuchen in verschiedenen Konfigurationen erneut getestet, sodass insgesamt sieben Filterkonfigurationen (F1A1, F1A2, F1A3, F1B1, F1C1, F2A1 und F2A2) vorliegen (Abbildung 3.8). Hierbei weisen die Filtermaterialien F1A1, F1A2 und F1A3 ähnliche Kornverteilungen auf. Der Korndurchmesser d_{10F} bei 10 % Massendruckgang des Filters F1B1 entspricht annähernd den Korndurchmessern d_{10F} der Konfigurationen F2A1 und F2A2. Dies lässt wichtige Schlüsse auf das unterschiedliche Verhalten des Filters bei hydraulischer Belastung zu (siehe Abschnitt 2.1.2).



Abb. 3.8: Untersuchte Filtermaterialien in der Versuchszelle der Wechseldurchströmungsanlage

Herstellung und Behandlung der Filterproben: Vor Versuchsdurchführung werden die Materialien aus einzelnen Kornfraktionen gemischt, um die gewünschten Kornverteilungen zu erhalten (Tabelle 3.3).

Tab. 3.3: Geometrische und geotechnische Filtereigenschaften

Filter	Abstandsverhältnis			Ungleichförmigkeit	Krümmungszahl	Durchlässigkeit ¹⁾	Porosität ²⁾
	d_{15F}/d_{85B}	d_{15F}/d_{50B}	d_{15F}	$U = d_{60F}/d_{10F}$	C_C	k_f	n_F
	-	-	mm	-	-	10^{-4} m/s	-
Basis				1,3	1,2	3,8	0,39
F1A1	4,5	4,8	1,2	5,9	1,5	62	0,31
F1A2	4,5	4,8	1,2	5,9	1,5	62	0,31
F1A3	4,3	4,6	1,2	6,6	1,9	56	0,31
F1B1	19,9	21,3	5,4	5,5	1,7	700	0,31
F1C1	2,3	2,4	0,6	2,3	1,2	35	0,35
F2A1	8,3	8,9	2,2	4,8	1,7	340	0,32
F2A2	9,9	10,5	2,7	2,5	1,9	510	0,34

¹⁾ nach Hazen (siehe Abschnitt 2.2.3)

²⁾ nach Beyrer und Schweiger, 1969 bezogen auf eine mittlere (natürliche) Lagerungsdichte (siehe Abschnitt 2.1.4)

Das Mischen erfolgt im trockenen Zustand und die Probe wird anschließend unter Wasser gelagert, um eine hohe Sättigung zu erzielen. Das Material wird in der Versuchszelle ebenfalls unter Wasser locker ohne zusätzliche Verdichtung eingebaut. Hierbei wird die Entmischung des Materials durch wiederholendes Mischen vor dem Einbau und durch geringe Fallhöhen reduziert. Das Vorgehen wird für alle Filterkonfiguration in gleicher Weise wiederholt, sodass annähernd gleiche Einbaubedingungen in Bezug auf Sättigungsgrad und Lagerungsdichte gewährleistet sind.

Die Probe sowie die Filterröhrchen der Drucksensoren werden bei einem Druck von über 4 bar über Ventile entlüftet, sodass der Einfluss von eingeschlossenen Luftblasen auf die Druckmessung sowie auf die hydraulischen Bedingungen reduziert wird.

Nach der Durchführung einer Versuchsreihe, bestehend aus mehreren Versuchen an einer Aufbauvariante mit unterschiedlicher hydraulischer Belastung, wird das Filtermaterial von der Oberkante schichtweise ausgebaut, um eine Korngrößenverteilung über die Höhe des Aufbaus zu erhalten. Das Material wird bis zu der Tiefe ausgebaut, an der noch Filtermaterial aufgefunden wird.

Die Filtermaterialien werden teilweise mehrfach gemischt und beprobt, sodass nur geringe Abweichungen der geometrischen Eigenschaften vorliegen. Es werden Abstandsverhältnisse im Bereich von $d_{15F}/d_{85B} = 2,3$ bis 19,9 und Ungleichförmigkeiten im Bereich von $U = 2,3$ bis 6,6 untersucht. Die Einordnung der Materialien in geometrisch geschlossen und geometrisch offen werden in Abschnitt 5.3 vorgenommen.

3.3 Datenaufbereitung

Die Messdaten werden mit 100 Hz in einem dezentralen Messsystem erfasst und an dem Leitcomputer (siehe Abschnitt 3.1.1) aufgezeichnet. Die Messdaten unterliegen geringen Störsignalen und werden daher lediglich mit einem 30 Hz Tiefpassfilter aufbereitet. Zusätzlich werden für die weitere Auswertung Zeitfenster gesetzt, um die ersten 180 s in der Zeitreihe von 1200 s zu reduzieren, damit Effekte aus der Anlaufphase der Versuchsanlage vermieden werden.

Aus den eingesteuerten Druckverläufen werden durch Zeitreihenanalyse die äquivalenten Parameter der Wellen mit freier Wasseroberfläche ermittelt, die die gleichen Druckverläufe erzeugen würden (Abschnitt 3.3.1). Anschließend erfolgt die Ermittlung des hydraulischen Gradienten und der Filtergeschwindigkeit (Abschnitt 3.3.2). Schließlich wird die Aufbereitung der Daten zur Filterauflast und vertikalen Verformung beschrieben (Abschnitt 3.3.3).

3.3.1 Äquivalente Wellenparameter

Vor dem Hintergrund welleninduzierter Porenwasserdrücke in Filteraufbauten ist es zweckmäßig, die Druckverteilung in Zusammenhang mit den Wellenparametern Wellenhöhe H , Wellenperiode T und der Wassertiefe h zu bringen. Die Druckrandbedingungen werden für die Versuchsanlage, wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, nach linearer Wellentheorie ermittelt. Anschließend werden die Wellenparameter äquivalent zu Wellen mit freier Wasseroberfläche aus der Zeitreihe des Drucks ermittelt. Die äquivalenten Wellenparameter (Wellenhöhe H_{eq} und Wellenperiode T_{eq} bzw. Wellenlänge L_{eq} in der Wassertiefe h_{eq}) werden wie folgt ermittelt (Abbildung 3.9):

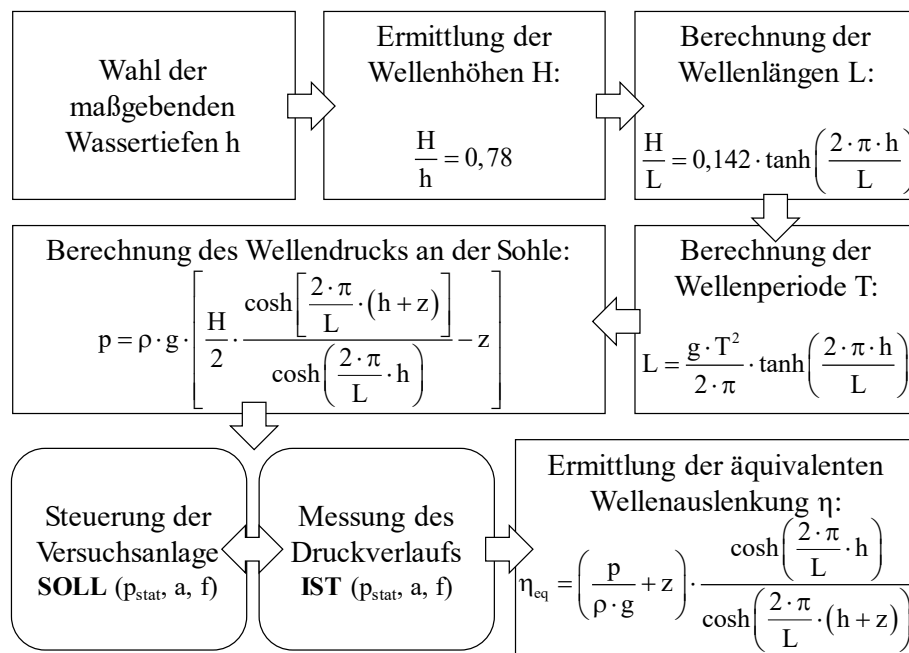


Abb. 3.9: Vorgehen bei der Ermittlung der äquivalenten Wellenparameter

Aus dem gemessenen Druck am Zulauf der Versuchszelle ergibt sich die äquivalente Wassertiefe h_{eq} aus dem hydrostatischen Druckanteil und die äquivalente Wellenhöhe H_{eq} aus dem dynamischen Druckanteil unter der Annahme einer freien Wasseroberfläche und der linearen Wellentheorie. Aus Gleichung 2.9 wird die äquivalente Wasserspiegelauslenkung η_{eq} ermittelt.

$$\eta_{eq} = \left(\frac{p}{\rho \cdot g} + z \right) \cdot \frac{\cosh\left(\frac{2\pi}{L} \cdot h\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi}{L} \cdot (h + z)\right)} \cdot \sin(\theta) \quad (3.2)$$

mit:

- η_{eq} : äquivalente Wasserspiegelauslenkung in m
- p : Druck in N/m²
- ρ : Rohdichte in kg/m³
- z : Bezugshöhe zum Ruhewasserspiegel in m (an der Sohle: $z = -h$)
- h : Wassertiefe in m
- L : Wellenlänge in m
- θ : Phasenwinkel

Aus der äquivalenten Wasserspiegelauslenkung η_{eq} wird schließlich die äquivalente Wellenhöhe H_{eq} mit Gleichung 2.9 bestimmt. Dabei weichen die geregelten Zielgrößen geringfügig von den tatsächlich erreichten Druckverläufen in der Wechseldurchströmungsanlage ab. Gründe hierfür liegen in den Systemgrenzen der Versuchsanlage (siehe Abschnitt 3.1.3). Zur Auswertung der Filterstabilität werden daher die tatsächlichen hydraulischen Parameter aus dem erzeugten Druck an den beiden Zuläufen der Versuchszelle ermittelt. Die äquivalente Wellenhöhe H_{eq} wird durch Mittelwertbildung der 33 % der höchsten Druckamplituden in der Zeitreihe berechnet. Die äquivalente Wellenperiode T_{eq} wird in der Zeitreihenanalyse mit Hilfe der „Zero-Downcrossing“-Methode (Zerlegung der Zeitreihe an Nulldurchgängen zwischen positiven und negativen Werten) ermittelt. Da (annähernd) regelmäßige Druckänderungen generiert werden, wird im weiteren Verlauf der Auswertung die äquivalente Wellenperiode T_{eq} , die Periode aus dem Mittelwert der 33 % höchsten Druckamplituden verwendet. Zur Einordnung der hydraulischen Randbedingungen im Laborexperiment in die Anwendungsbereiche der Wellentheorien werden die Daten mit $H_{eq}/g \cdot T_{eq}^2$ und $h_{eq}/g \cdot T_{eq}^2$ aufgetragen (Abbildung 3.10).

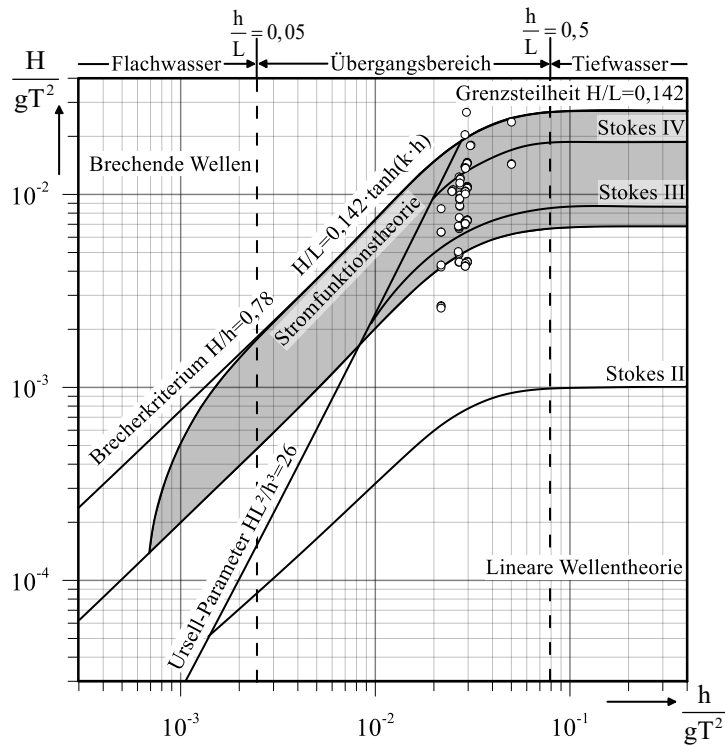


Abb. 3.10: Einordnung der Laboruntersuchungen in die Anwendungsbereiche der Wellentheorien (modifiziert nach SPM (1984))

Die in der Wechseldurchströmungsanlage (ohne freie Wasseroberfläche) erzeugten äquivalenten Wellenparameter nach linearer Wellentheorie entsprechen Wellentheorien höherer Ordnung (Stokes 2. Ordnung bis Stokes 5. Ordnung) bei Wellen mit freier Wasseroberfläche und erreichen Wellensteilheiten bis zur Grenzsteilheit $H_{eq}/L_{eq} = 0,142$ (Abbildung 3.10). Hierdurch wird ein relativ großer Bereich der maßgebenden hydraulischen Einwirkung zur Untersuchung der Filterstabilität abgedeckt.

Die äquivalenten Wellenparameter im Labor liegen ausserhalb des Anwendungsbereichs der linearen Wellentheorie. Die lineare Wellentheorie ist jedoch für die Fragestellung dieser Studie in Bezug auf die vertikale Druckverteilung bei relativ langen Wellenlängen nach Zen und Yamazaki (1990) hinreichend genau sowie einfach in der Anwendung und wird daher als Grundlage für die Laboruntersuchungen verwendet.

3.3.2 Porenwasserdruckverteilung und Filtergeschwindigkeit

a) Hydraulischer Gradient: Der hydraulische Gradient wird aus der Druckdifferenz der einzelnen Ebenen (1-9) sowie über die Höhe der Filterschicht (1-5) und der Basisschicht (5-9) ermittelt. Die Definitionsskizze in Abbildung 3.11 zeigt die Anordnung der Druckmesszellen auf neun Messebenen.

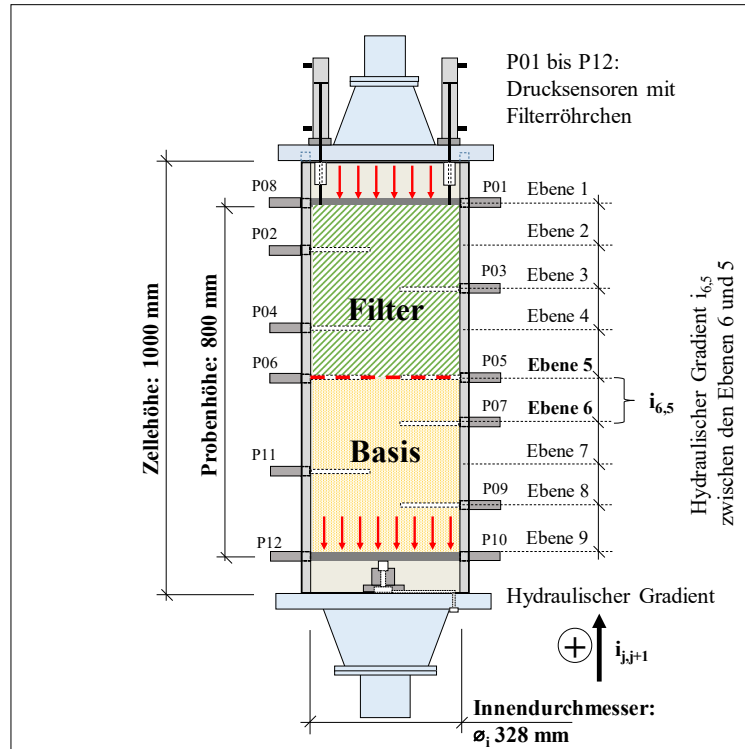


Abb. 3.11: Definitionsskizze der Versuchszelle mit Ebenen der Druckmessung

Der hydraulische Gradient zwischen zwei Messebenen j und $j+1$ wird mit folgender Gleichung ermittelt:

$$i_{j,j+1} = \left(\frac{p_{j+1} - p_j}{\rho_w \cdot g} \right) \cdot \frac{1}{\Delta l_{j+1,j}} \quad (3.3)$$

mit:

- $i_{j-1,j}$: hydraulischer Gradient zwischen den Positionen j und $j+1$
- g : Erdbeschleunigung in m/s^2
- ρ_w : Rohdichte des Wassers in kg/m^3
- p_j : Druck (relativ) an der Position j in N/m^2
- $\Delta l_{j+1,j}$: Abstand zwischen den Positionen j und $j+1$ in m

b) Filtergeschwindigkeit: Die Filtergeschwindigkeit wird über den Durchfluss Q an den beiden Zuläufen der Versuchszelle wie folgt ermittelt:

$$v_f = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{d_{\text{Zelle}}^2 \cdot \pi \cdot 0,25} \quad (3.4)$$

mit:

- v_f : Filtergeschwindigkeit in m/s
- Q : Durchfluss in m^3/s
- A : Durchströmter Querschnitt der Versuchszelle in m^2
- d_{Zelle} : Innendurchmesser der Zelle in m (hier: $d_{\text{Zelle}} = 0,328 \text{ m}$)

Der spezifische Durchfluss wird mit magnetisch-induktiven Durchflussmessern erfasst. Dadurch können die Filtergeschwindigkeit v_f und der hydraulische Gradient i mit einer Abtastrate von 100 Hz erfasst werden.

3.3.3 Auflastregelung und Setzungsmessung

Aus den drei magnetisch induktiven Wegsensoren an den drei Pneumatikzylindern (wie in Abschnitt 3.1.2 und in Abbildung 3.3 dargestellt) wird das arithmetische Mittel des Weges mit positivem Vorzeichen als abwärts gerichtete Bewegung ermittelt. Durch die optimierte Führung der Kolbenstangen wird eine Schrägstellung reduziert, sodass nur geringe Differenzen der drei Positionen festgestellt werden.

3.3.4 Korrelations- und Regressionsanalyse

Die Güte der verwendeten Anpassungsfunktionen in der Auswertung der Messdaten wird mit dem Pearsonschen Korrelationskoeffizienten r angegeben (Eckey et al., 2008):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.5)$$

mit:

\bar{x} : Mittelwert der unabhängigen Variablen x_i

\bar{y} : Mittelwert der abhängigen Variablen y_i

Die Güte der verwendeten Anpassungsfunktionen wird in der Auswertung mit dem Determinationskoeffizienten (Bestimmtheitsmaß) R^2 als Verhältnis von der Variation der Residuen und der Variation der abhängigen Variablen y definiert. Dabei wird das Bestimmtheitsmaß bei vollständiger Übereinstimmung von Messdaten und Regressionsfunktion zu $R^2 = 1$ und bei keiner Übereinstimmung zu $R^2 = 0$ (Eckey et al., 2008):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.6)$$

mit:

R^2 : Determinationskoeffizient (Bestimmtheitsmaß)

n : Anzahl der Werte

\hat{y}_i : Variable der Regressionsfunktion

\bar{y} : Mittelwert der Variablen y_i

In der Modellbildung werden Regressionsanalysen durchgeführt, die mit dem Variationskoeffizienten unabhängig von den verwendeten Einheiten (dimensionslos) bewertet werden können. Der Variationskoeffizient $\sigma'(x)$ gibt das relative Streuungsmaß als Quotient aus der Standardabweichung σ und dem arithmetischen Mittel \bar{x} an (Eckey et al., 2008):

$$\sigma'(x) = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i} \quad (3.7)$$

mit:

$\sigma'(x)$: Variationskoeffizient der Variablen x (relative Standardabweichung)

σ : Standardabweichung

\bar{x} : Mittelwert der Variablen x_i

n : Anzahl der Werte

3.3.5 Modelleffekte und Randeinflüsse

Die Laborexperimente werden mit der optimierten Versuchszelle durchgeführt, sodass Modelleffekte reduziert werden können. Dennoch unterliegen die Ergebnisse einigen Modell- und Randeffekten, die unvermeidbar sind. Ein großer Vorteil der Wechseldurchströmungsanlage in Verbindung mit der speziellen Versuchszelle liegt in der Generierung des Wasserdrucks im Naturmaßstab. Weiterhin können in der Versuchszelle, aufgrund der gewählten Abmessungen, Bodenmaterialien, wie Sand und Kies im Naturmaßstab verwendet werden. Maßstabseffekte liegen aus diesem Grund für die Laborexperimente nicht vor, da die hydraulische Einwirkung und die verwendeten Materialien nicht skaliert wurden.

Effekt der freien Wasseroberfläche: Im geschlossenen Rohrleitungssystem werden Druckänderungen und damit Strömungen erzeugt. Im Vergleich zum Wellenkanal gibt es keine Interaktion der freien Wasseroberfläche mit der umgebenden Luft. Hierdurch können im offenen Kanal Wellen bis zu einer Grenzsteilheit $(H/L)_{\text{krit}}$ bzw. bis zu einem Grenzwert des Brecherindex $(H/h)_{\text{krit}}$ erzeugt werden. Die Druckänderungen im Wellentunnel können über diese Grenzwerte hinaus im Rahmen der Systemgrenzen der Anlagensteuerung erzeugt werden. Aus dem erzeugten Druckverlauf werden anschließend die äquivalenten Wellenparameter unter der Annahme von linearen Wellen ermittelt (Abbildung 3.9). Durch die Nichtlinearität von natürlichem Seegang oder auch der erzeugten Wellen in einem offenen Kanal findet abweichend zur linearen Wellentheorie ein Transport in Richtung der Wellenausbreitung statt (Nielsen, 1992; Schretlen et al., 2011).

Eigenschaften des Porenfluids: Im Vergleich zwischen der Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwerts aus vereinfachten theoretischen und empirischen Ansätzen ist die temperaturabhängige Viskosität des Wassers bei der Ermittlung aus Laborversuchen eine entscheidende Einflussgröße, die entsprechend zu berücksichtigen ist. Die Wassertemperatur in den Druckbehältern entspricht annähernd der Umgebungstemperatur im Labor von ca. $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. Zwischen niedrigster Temperatur von ca. 10 °C bei Auffüllung durch Frischwasser bis zur höchsten Temperatur bei erhöhter Innentemperaturen im Sommer sind Abweichungen der Durchlässigkeit von maximal 30 % zu erwarten. In der Versuchsdurchführung lagen größere zeitliche Abstände zwischen Befüllung und Versuchsbeginn vor, sodass dieser Einfluss geringer ausfällt, jedoch nicht vernachlässigbar ist. Durch Aufzeichnung der Raumtemperatur ist eine näherungsweise Korrektur nach DIN 18130-1 möglich.

Randeinflüsse: Die Randeinflüsse der Versuchszelle können in hydraulische und geohydraulische Einflüsse sowie in weitere Einflüsse auf den Materialtransport unterschieden werden. Weiterhin wird zwischen Randeinflüssen durch die äußere Zellwand, durch die obere und unter Probenbegrenzung sowie durch die angeschlossenen Rohrleitungen unterschieden.

a) Materialtransport: Durch die geotextilen Filter an der Ober- und Unterseite der Probe ist ein Austrag des Basismaterials nicht möglich. Der Prozess der Suffosion im Kornfilter wird durch den Rückhalt am Geotextil (Kolmation des Filters) beeinflusst. Durch diesen Prozess wird die Kontakterosion an der Schichtgrenze zwischen Basis und Filter nach einer längeren Versuchsdauer reduziert. Aus diesem Grund wird eine Versuchsreihe abgebrochen, wenn eine Auffüllung des Porenraums durch Basismaterial am oberen Zellenrand festgestellt wird, sodass dieser Einfluss vermieden wird.

b) Porenwasserdruck: Durch die begrenzte Aufbauhöhe der Versuchszelle ist es nicht möglich eine so hohe Dicke der Basisschicht zu verwenden, wie sie erforderlich ist, um einen Bereich sehr geringer dynamischer Porenwasserdruckänderungen zu erreichen. Aus diesem Grund wird die Dämpfung unterhalb der Basisschicht durch die Wechseldurchströmungsanlage gesteuert, sodass ein gedämpfter dynamischer Druck vorliegt. Der Einfluss der Druckdämpfung im Basismaterial auf den hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze bedarf weiterer Untersuchungen.

c) Spannungen und Dehnungen: Die Verformung der Probe unterliegt einem Modelleffekt durch die Ausdehnung der Versuchszelle in vertikaler und axialer Richtung. Durch die Vorspannung der Zellwand und des Deckels wird dieser Effekt soweit reduziert, dass eine Ausdehnung sehr klein wird und nicht messbar ist.

Maßstabseffekte: Während die hydraulischen Randbedingungen im Laborexperiment keiner Skalierung unterliegen (Naturmaßstab), bestehen Einschränkungen der geotechnischen Eigenschaften des Basis- und Filtermaterials. Wird wesentlich gröberes Material als das untersuchte Basis- und Filtermaterial ($d_{50B} = 0,25 \text{ mm}$; $d_{15F} = 0,6 - 5,4 \text{ mm}$) betrachtet, so unterliegen die geohydraulischen Prozesse Maßstabseffekten durch den höheren Grad der Turbulenz ($Re^* \gg 1$). Wird feineres Material betrachtet, so entstehen Maßstabseffekte durch kohäsive Kräfte in der Bodenmatrix, sodass ein höherer Widerstand gegenüber Erosionsprozessen entsteht. Weiterhin nehmen viskose Kräfte des Porenfluids gegenüber den Trägheitskräften zu ($Re^* < 1$), sodass laminare bis schleichende Strömung vorliegt. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse der Laborexperimente für das untersuchte (nicht-kohäsive) Basis- und Filtermaterial im Bereich des untersuchten Strömungsregimes gültig (siehe Abschnitt 6.2.2).

3.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für die Analyse der Versuchsergebnisse

Zur Entwicklung generischer Bemessungsansätze werden systematische Laborversuche durchgeführt. Das umfangreiche Versuchsprogramm liefert detaillierte Daten zum Porenwasserdruck, Durchfluss, Auflast und Weg. Aus diesen Messgrößen können weitere Parameter, wie hydraulischer Gradient, Filtergeschwindigkeit, vertikale Verformung und Spannungen ermittelt werden. Hierdurch wird es möglich, kritische Parameter zum Bewegungsbeginn in Abhängigkeit der Wellenparameter zu bestimmen. Die Unsicherheiten aus Messfehlern sowie aus Modell- und Randeinflüssen sind in Abschnitt 3.3.5 beschrieben. Hierbei konnte in Vorversuchen festgestellt werden, dass diese Einflüsse durch die Optimierung des Aufbaus reduziert werden.

Es ist zweckmäßig die bodenmechanischen und geohydraulischen Prozesse getrennt zu betrachten. Hierzu wird die Filterstabilität anhand der visuellen Beobachtungen, der Verformung und anhand des hydraulischen Widerstands bewertet. Somit können die hydraulischen Prozesse für den stabilen Zustand des Filteraufbaus (Basis-/Filtermaterial) ohne Störeinflüsse durch Erosionsprozesse analysiert werden.

Für den instabilen Filterzustand (ab Bewegungsbeginn/Kontakterosion) werden folgende Prozesse beschrieben (Kapitel 5):

- (i) Vertikale Verformung des Filteraufbaus (Basis-/Filtermaterial)
- (ii) Zusammenhang zwischen vertikaler Verformung und dynamischer Filtereigenschaften
- (iii) Zusammenhang zwischen den geohydraulischen Parametern und der vertikalen Verformung
- (iv) Beschreibung der Kontakterosion, Infiltration und innerer Erosion durch Analyse der Kornverteilungen in einzelnen Schichten des Filteraufbaus

Für den stabilen Filterzustand (vor Bewegungsbeginn/Kontakterosion) werden folgende hydraulische Prozesse analysiert (Kapitel 6):

- (i) Porenwasserdruckverteilung in der Filter- und Basisschicht
- (ii) Hydraulische Gradienten in Abhängigkeit der Filtergeschwindigkeit
- (iii) Zusammenhang zwischen Wellenparametern und hydraulischem Gradienten

Neben den in diesem Kapitel beschriebenen hydraulischen Laboruntersuchungen wird im vierten Kapitel das Vorgehen der numerischen Untersuchungen erläutert, die unter anderem zur Ergänzung der Experimente in Bezug auf die hydraulischen Prozesse im stabilen Filterzustand (ohne Materialtransport) dienen. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen werden im fünften Kapitel zu den hydraulischen Prozessen und im sechsten Kapitel zu den geohydraulischen Prozessen im Detail erläutert. Anschließend werden die Modellbildung und die Entwicklung von Bemessungsansätzen im siebten Kapitel beschrieben.

4 Numerische Modellierung der (geo-) hydraulischen Prozesse

Es wird angestrebt, das Verständnis der hydraulischen Prozesse im Filteraufbau (Basis-/Filtermaterial) durch die Bewertung und Erweiterung der gewonnenen Erkenntnisse aus den systematischen Laborexperimenten mit Hilfe der numerischen Modellierung zu verbessern. Ergänzend zu den Experimenten mit der Wechseldurchströmungsanlage (Kapitel 3) dient die numerische Modellierung zur Untersuchung der Randeinflüsse, Modelleffekte und zur Ergänzung des Versuchsprogramms außerhalb der technischen Grenzen der Versuchsanlage. Der Aufbau des numerischen Modells zur Analyse der hydraulischen und geohydraulischen Prozesse im Filteraufbau wird in diesem Kapitel beschrieben. Dazu werden in Abschnitt 4.1 die Anforderungen an die numerische Modellierung mit einem Vergleich verfügbarer Modelle und Lösungsansätze zusammengefasst (Abbildung 4.1).

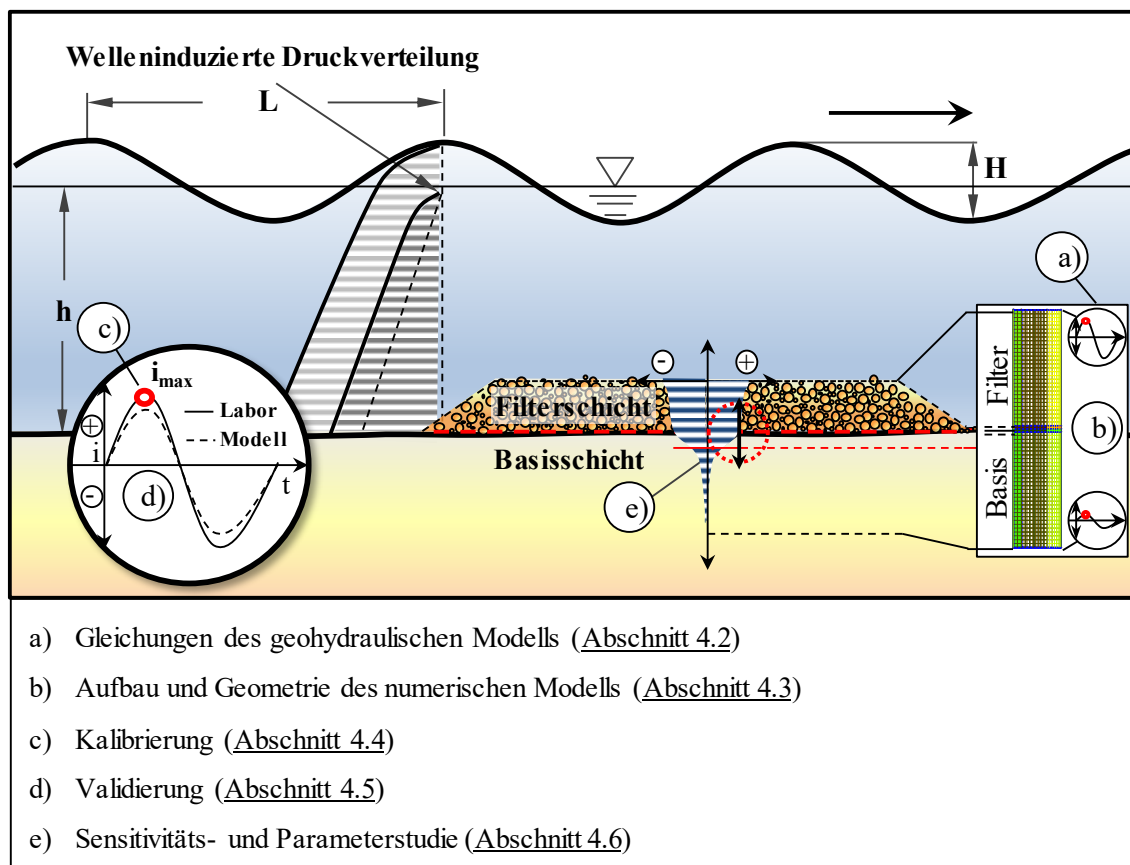


Abb. 4.1: Übersicht der numerischen Modellierung geohydraulischer Prozesse in diesem Kapitel

In Abschnitt 4.2 ist das geohydraulische Modell *geotechFoam* nach El Safti, 2015 und Elsafti und Oumeraci, 2016 mit den Erhaltungsgleichungen und der Gleichungslösung für die Anwendung in dieser Studie erläutert. Anschließend wird in Abschnitt 4.3 die räumliche und zeitliche Diskretisierung zur Modellierung der hydraulischen Prozesse im Filteraufbau (Basis-/Filtermaterial) beschrieben (Abbildung 4.1). Die Kalibrierung anhand der Laborversuche und die systematische Validierung des numerischen Modells werden jeweils in Abschnitt 4.5 und in Abschnitt 4.4 durchgeführt und diskutiert. Das Testprogramm der numerischen Parameterstudie wird mit Hilfe der Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse optimiert und in Abschnitt 4.6 bewertet. Die Anwendbarkeit und die Einschränkungen des numerischen Modells werden in Abschnitt 4.7 zusammengefasst. Abschließend werden die Ergebnisse der Parameterstudie in Abschnitt 4.8 zusammengefasst und bewertet.

4.1 Anforderungen an die numerische Modellierung

Die Zielsetzung dieser Studie liegt in der Beschreibung der hydraulischen Stabilität von Kornfiltern in Abhängigkeit des kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} und der kritischen Filtergeschwindigkeit $v_{f,\text{krit}}$ der welleninduzierten Strömung im Basis- und Filtermaterial. Die hydraulische Filterbemessung unter Seegangseinwirkung erfordert die Kenntnis der Relation zwischen Wellenparametern (Wellenhöhe, Wellenlänge und Wassertiefe) und den resultierenden hydraulischen Gradienten i sowie der Filtergeschwindigkeit v_f . Zu diesem Zweck werden die Laborexperimente durch die numerische Modellierung unterstützt. Der Fokus der numerischen Untersuchungen liegt dabei auf den hydraulischen Prozessen im Filteraufbau ohne Transportprozesse, um einen Vergleich der hydraulischen Laborexperimente mit ungestörten Bedingungen herstellen zu können. Hierbei zeigt sich die Eignung des Kontinuum-Modells *geotechFoam* gegenüber Partikelmodellen und netzfreien Methoden (siehe Abschnitt 2.3.1) in Bezug auf die Diskretisierung der Randbedingung anhand der im Laborexperiment ermittelten hydraulischen Parameter. Zur Anwendung und Kalibrierung des Kontinuum-Modells können alle erforderlichen hydraulischen und geotechnischen Parameter im Labor ermittelt werden. Im Vergleich zu Partikelmodellen (u.a. Diskrete-Elemente-Methode, Lattice-Boltzmann-Methode) und netzfreien Modellen (u.a. Smoothed Particle Hydrodynamics, Material Point Method) liegen keine unbekannten Parameter vor, wie die Korn-zu-Korn-Interaktion und die Anordnung sowie Nachbarschaftsbeziehungen der Einzelkörner. Weiterhin ergibt sich durch die Optimierung des Rechengitters für das Kontinuum-Modell eine deutlich geringere Rechenzeit gegenüber Partikelmodellen und netzfreien Methoden für die Fragestellung dieser Studie. Hierdurch ist trotz einer sehr hohen Anzahl der Einzelkörner und einer relativ großen und nicht skalierten Porengeometrie die Machbarkeit für die Durchführung systematischer Sensitivitäts- und Parameterstudien gegeben. Aus der Analyse des Schrifttums und theoretischen Überlegungen zur geeigneten Methodik ergeben sich folgende Anforderungen an das numerische Modell, um die in Abschnitt 1.2 definierten Ziele zu erreichen:

- Abbildung des welleninduzierten Porenwasserdrucks und der Filtergeschwindigkeit in den porösen Medien
- Hohe Auflösung zur Erfassung der hydraulischen Prozesse und des maximalen hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze
- Simulation des Porenwasserdrucks unter Berücksichtigung der Kompressibilität des Porenfluids sowie der Bodenspannungen und -verformungen im Filteraufbau (Basis-/Filtermaterial)

Das numerische Modell wird eingesetzt, um den Zusammenhang zwischen Wellenparametern und dem hydraulischen Gradienten aus den Laborexperimenten zu verbessern und zu erweitern. Daher liegt der Fokus auf der Modellierung der hydrodynamischen Prozesse im hydraulisch stabilen Zustand des Kornfilters (ohne Materialbewegung). Die numerischen Untersuchungen der hydraulischen Prozesse werden anschließend mit den dynamischen geohydraulischen Prozessen der Laborexperimente analysiert und diskutiert. Zur Ergänzung hydraulischer Laborexperimente durch den Einsatz numerischer Modelle ergibt sich die Notwendigkeit, die im Labor messbaren und im numerischen Modell erfassbaren Parameter vergleichen zu können. Hierzu stellen die im Labor gemessene Porenwasserdruckverteilung und die querschnittsgemittelte Filtergeschwindigkeit geeignete makroskalige Größen dar, die auch im numerischen Kontinuum-Modell sehr gut erfasst werden können. Hierdurch wird eine Validierung des numerischen Modells ermöglicht. Für die zuvor genannten Anforderungen stehen folgende Lösungen im Modell *geotechFoam* zur Verfügung (Tabelle 4.1):

Tab. 4.1: Anforderung an das numerische Modell und verfügbare Lösungen

Anforderungen an das numerische Modell	Modellierung in <i>geotechFoam</i>
Modellierung des Zusammenhangs zwischen Bodenspannung, Verformung und Porenwasserdruck	Volldynamischer Ansatz nach Biot unter Berücksichtigung der Kompressibilität des Porenfluids und Verformung der Bodenmatrix (siehe Abschnitt 4.2.1 und 4.2.2)
Simulation der instationären Strömung in porösen Medien in Abhängigkeit des Strömungsregimes	Implementierung der Darcy-Gleichung und der erweiterten Darcy-Forchheimer-Gleichung (siehe Abschnitt 4.2.1 und 4.2.2)
Modellierung des Übergangs zweier in Reihe durchströmter poröser Medien	Optimierung der Gleichungslösung zur Ermittlung der Filtergeschwindigkeit an der Schichtgrenze und Optimierung der räumlichen Diskretisierung durch Übergangsschichten (siehe Abschnitt 4.2.3)
Hohe Auflösung zur Erfassung des maximalen hydraulischen Gradienten	Gitternetzoptimierung mit verdichteten Gitterabständen an der Schichtgrenze (siehe Abschnitt 4.3.1)
Abbildung des welleninduzierten Porenwasserdrucks im porösen Medium	Erweiterung der Randbedingungen zur Anwendung der Porenwasserdruckverteilung unter fortschreitenden Wellen nach linearer Wellentheorie (siehe Abschnitt 4.3.2)

4.2 Gleichungen des geohydraulischen Modells *geotechFoam*

Das geohydraulische Modell *geotechFoam* wurde nach El Safti (2015) in der Umgebung *openFOAM*[®] entwickelt. In diesem Abschnitt werden die Erhaltungsgleichungen des geotechnischen Modells sowie die Besonderheiten der Gleichungslösung für die Anwendung in dieser Studie beschrieben. Die Strömung in porösen Medien kann durch die volumengemittelten Eigenschaften der Bodenmatrix und des Porenfluids beschrieben werden. Hierbei besteht ein enger Zusammenhang zwischen den effektiven Spannungen im Korngerüst und dem Porenwasserdruck. Das Verformungsverhalten der Bodenmatrix kann basierend auf den Navier-Stokes-Gleichungen und dem Darcy-Gesetz durch die Formulierungen nach Biot (1956a & b) berücksichtigt werden. Das geohydraulische Modell *geotechFoam* nach El Safti (2015) basiert auf den vollständig gekoppelten volldynamischen Biot-Gleichungen. In Abbildung 4.2 ist eine Übersicht der verschiedenen geotechnischen Ansätze mit den in dieser Studie verwendeten Ansätzen dargestellt.

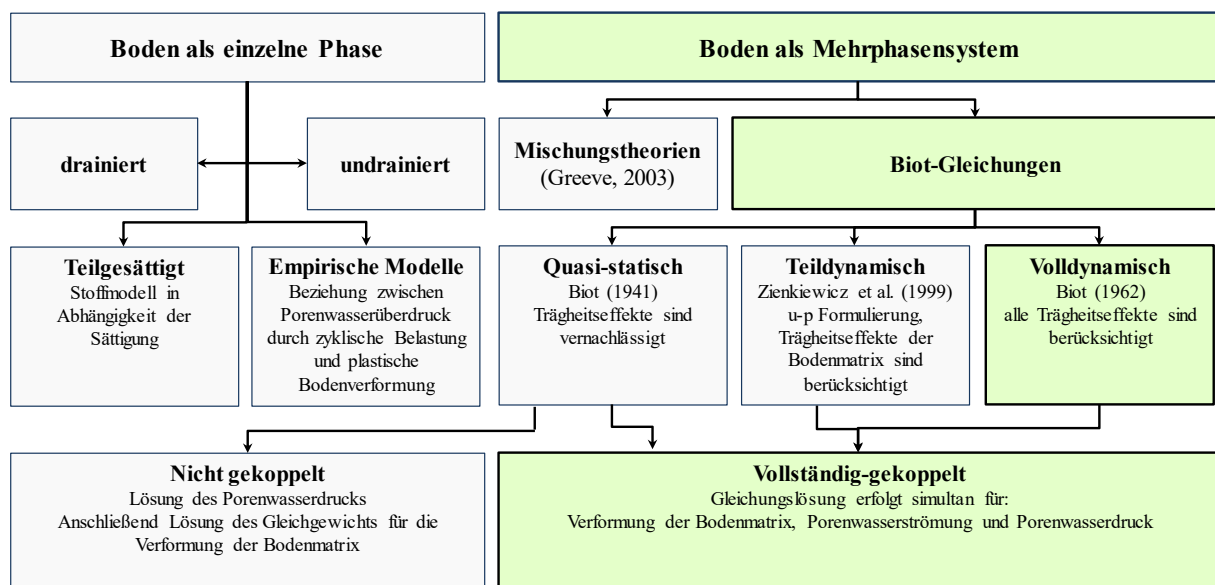


Abb. 4.2: Ansätze zur geotechnischen Modellierung (die in dieser Studie verwendete Ansätze sind in Grün hervorgehoben) nach El Safti, 2015

Zur Berücksichtigung der Kompressibilität des Fluids wurde der Massenerhaltungssatz erweitert. Zur Beschreibung der Volumenänderung in Abhängigkeit der Druckänderung wird das Kompressionsmodul unter Berücksichtigung von Phasenanteil, Sättigungsgrad und Porosität ermittelt (El Safti, 2015). Hierdurch wird eine systematische Studie der maßgebenden Parameter zur Entwicklung des Porenwasserdrucks, des hydraulischen Gradienten und der Filtergeschwindigkeit im Basis- und Filtermaterial ermöglicht.

4.2.1 Massenerhaltung

Der Massenerhaltungssatz des Porenfluids wird nach Biot (1956b) wie folgt berücksichtigt (Zienkiewicz et al., 1999):

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_f + \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{n}{K_f} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (4.1)$$

mit:

- \mathbf{v}_f : Vektor der Filtergeschwindigkeit in m/s
- ε_v : volumetrische Dehnung der Bodenmatrix
- n : Porosität
- K_f : Kompressionsmodul des Porenfluids in N/m²
- t : Zeit in s
- p : Druck in N/m²

In Gleichung 4.1 ist die Rohdichte des Porenfluids sowie der Sättigungsgrad S im Kompressionsmodul des Porenfluids K_f beinhaltet, sodass eine Teilsättigung des porösen Mediums berücksichtigt werden kann. Die Eigenschaften der Fluide sind in Bezug auf die Bedingungen der hydraulischen Laborversuche gewählt worden. Das Kompressionsmodul für das verwendete Wasser beträgt $K_w = 2200$ MPa. Die Verformung der Bodenmatrix wird durch ein linear elastisches Bodenmodell unter der Berücksichtigung isotropischer Spannung modelliert.

4.2.2 Impulserhaltung

Der Impulserhaltungssatz des Boden-Wasser-Gemisches im vollständig (gekoppelten) dynamischen Ansatz nach Biot (1962) ist nach Zienkiewicz et al. (1999) wie folgt beschrieben (El Safti, 2015):

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} - \rho_s \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} - c \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \rho_f \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{v}_f}{\partial t} + \mathbf{v}_f \cdot \nabla \mathbf{v}_f \right) + \rho_s \cdot \mathbf{g} = 0 \quad (4.2)$$

Hierin kann die Filtergeschwindigkeit \mathbf{v}_f nach Darcy oder nach der (erweiterten) Forchheimer-Gleichung beschrieben werden (siehe Abschnitt 2.2.3). Neben der Impulsgleichung des Boden-Wasser-Gemisches wird die Impulsgleichung für die feste Phase (Boden) verwendet (El Safti, 2015):

$$\rho_f \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{v}_f}{\partial t} + \mathbf{v}_f \cdot \nabla \mathbf{v}_f \right) \cdot \frac{1}{n} = -\nabla p - \rho_f \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + \rho_f \cdot \mathbf{g} - S_t \quad (4.3)$$

mit:

- $\boldsymbol{\sigma}$: Tensor der Totalspannung
- \mathbf{u} : Vektor der Verformung in m
- t : Zeit in s
- c : Dämpfungskoeffizient
- \mathbf{v}_f : Vektor der Filtergeschwindigkeit in m/s
- ρ_f : Dichte des Fluids in kg/m³
- ρ_s : Dichte des vollständig gesättigten Bodens in kg/m³
- n : Porosität
- p : Porenwasserdruck in N/m²
- \mathbf{g} : Erdbeschleunigung in m/s²
- S_t : Senkenterm (Strömungswiderstand)

Weiterführende Beschreibungen des Modells *geotechFoam* sind in El Safti (2015) und Elsafti und Oumeraci (2016) gegeben.

4.2.3 Unstetigkeit an der Grenze zweier Bodenschichten unterschiedlicher Durchlässigkeit

Wird die Fließgeschwindigkeit in porösen Medien auf der Grundlage des Darcy-Gesetzes aus den Druckdifferenzen der angrenzenden Zellen ermittelt, so ergibt sich an der Schnittstelle eine Unstetigkeit, die zur fehlerhaften Gleichungslösung führt. In Abbildung 4.3 ist eine Systemskizze mit den geohydraulischen Eigenschaften und der räumlichen Diskretisierung dargestellt.

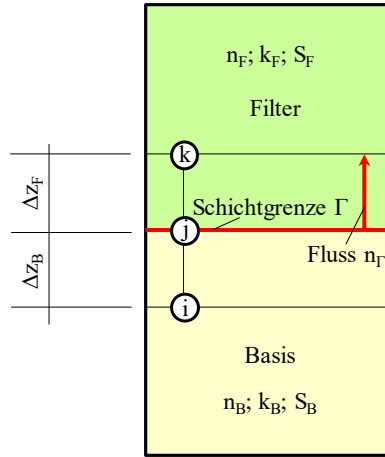


Abb. 4.3: Systemskizze zur Illustration der Unstetigkeit an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial (modifiziert nach Szymkiewicz, 2012)

Bei einer Durchströmung der in Reihe liegender Basis- und Filterschicht wird der Fließzustand im Filter hauptsächlich durch die geringere Durchlässigkeit des Basismaterials bestimmt. Die Strömung in den porösen Medien kann bei einer geringen äquivalenten Durchlässigkeit des gesamten Schichtaufbaus aufgrund des annähernd laminaren Fließzustands mit der Darcy-Gleichung beschrieben werden. Für den Übergang zwischen den beiden Schichten, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, müssen Schnittstellenbedingungen definiert werden. Die Dicke der Übergangsschicht liegt in der Größenordnung des Porendurchmessers d_p im Filter und wird im Folgenden als unendlich klein angenommen. Die Massenerhaltung erfordert, dass der Massenfluss senkrecht zur Ebene der Schichtgrenze in beide Richtungen gleich ist ($n_{\Gamma,B} = n_{\Gamma,F}$). Die Filtergeschwindigkeit in den angrenzenden Zellen der Schichtgrenze zwischen zwei porösen Medien (hier Basis- und Filtermaterial) kann wie folgt ermittelt werden (Szymkiewicz, 2012):

$$-k_B \cdot \frac{p_j - p_i}{\Delta z_B} = -k_F \cdot \frac{p_k - p_j}{\Delta z_F} = -k_{eq} \cdot \frac{p_k - p_i}{\Delta z_B + \Delta z_F} \quad (4.4)$$

mit (siehe Abbildung 4.3):

- k_B : Durchlässigkeitsbeiwert des Basismaterials in m/s
- k_F : Durchlässigkeitsbeiwert des Filtermaterials in m/s
- k_{eq} : äquivalenter spezifischer Durchlässigkeitsbeiwert in m/s
- p_i : Druck an der Stelle i in N/m²
- p_j : Druck an der Stelle j in N/m²
- p_k : Druck an der Stelle k in N/m²
- Δz_B : Zellabstand zur Schichtgrenze im Basismaterial in m
- Δz_F : Zellabstand zur Schichtgrenze im Filtermaterial in m

Der äquivalente spezifische Durchlässigkeitsbeiwert k_{eq} kann als gewichtetes harmonisches Mittel der Durchlässigkeit von Basis- und Filtermaterial betrachtet werden. Unter Annahme der Kontinuität des Drucks ober- und unterhalb der Schichtgrenze ($p_i = p_j$), ist k_{eq} wie folgt definiert (Szymkiewicz, 2012):

$$k_{eq} = \frac{\frac{\Delta z_B + \Delta z_F}{\frac{\Delta z_B}{k_B} + \frac{\Delta z_F}{k_F}}}{\quad} \quad (4.5)$$

Die räumliche Diskretisierung des heterogenen porösen Mediums, bestehend aus einer Basis- und Filterschicht, kann mit dem äquivalenten spezifischen Durchlässigkeitsbeiwert k_{eq} durchgeführt werden. Dieser Durchlässigkeitsbeiwert ist richtungsunabhängig und die Kontinuität des Porenwasserdrucks an der Schichtgrenze basiert auf einem konstanten Sättigungsgrad in beiden Materialien. Zu dem Schnittstellenproblem zwischen freiem Wasser und porösen Medien wurden detaillierte Untersuchungen (u. a. von Hassanizadeh und Gray (1989); Helmig et al. (2006); DeGroot und Straatman (2011)) durchgeführt. Die Lösung des Schnittstellenproblems erfolgt über die Kontinuität der Fließgeschwindigkeit an der Schnittgrenze (DeGroot und Straatman, 2011).

Eine weitere Verbesserung der numerischen Lösung an der Schichtgrenze zwischen zwei porösen Medien unterschiedlicher Durchlässigkeit kann durch eine schrittweise Änderung der Durchlässigkeit über viele Zwischenschichten erfolgen. Dies kann durch eine Verfeinerung des Rechengitters an der Schichtgrenze und die iterative Berechnung des äquivalenten Durchlässigkeitsbeiwertes jeder einzelnen Zwischenschicht erfolgen. Dieses Vorgehen wird in Abschnitt 4.3.1 detailliert beschrieben.

4.3 Aufbau und Geometrie des numerischen Modells

Zur Erweiterung der hydraulischen Laborversuche wird der Modellaufbau der Versuchszelle in der Wechseldurchströmungsanlage im numerischen Modell verwendet. Der Aufbau des numerischen Modells (Abbildung 4.4) beinhaltet die Geometrie des Filteraufbaus in der Versuchszelle mit einer Filter- und einer Basisschicht (siehe auch Abschnitt 3.1.2). Hierbei werden die welleninduzierten Druckverläufe als hydraulische Randbedingungen an der Oberkante der Filterschicht und an der Unterkante der Basisschicht berücksichtigt. Die Leitungen der Wechseldurchströmungsanlage mit den Zuläufen der Versuchszelle werden dabei nicht im numerischen Modell abgebildet.

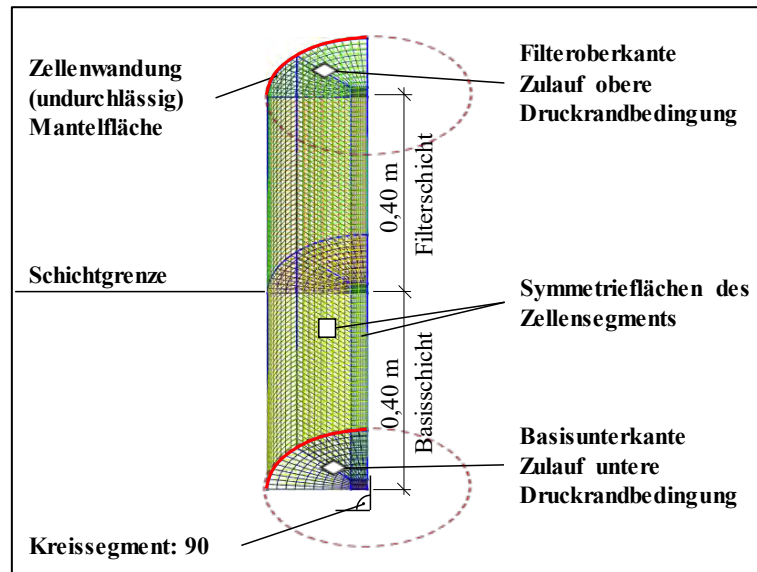


Abb. 4.4: Systemskizze zum Aufbau des numerischen Modells zu der Gittergenerierung (Abschnitt 4.3.1) und der Definition der Randbedingungen (Abschnitt 4.3.2)

4.3.1 Gittergenerierung und -optimierung

Das Rechengitter wird entsprechend der Geometrie der Versuchszelle erzeugt (siehe Abschnitt 3.1.2) und zur Simulation mit der Finiten-Volumen-Methode optimiert. Verschiedene Varianten werden hierzu getestet und verglichen (siehe Serwatka, 2016). Das Gitter in Form eines Quadranten der Zelle zeigt die besten Eigenschaften unter Berücksichtigung von Genauigkeit, numerischer Stabilität, Anwendbarkeit und Rechenzeit im Vergleich zu einem zweidimensionalen Modell oder einem vollständigen dreidimensionalen Modell der Versuchszelle. Da die Strömungsprozesse im Modell achssymmetrisch durch die Zelle verlaufen, kann die Grundfläche des Rechengitters auf ein Viertelkreissegment der Zelle reduziert werden. In der Grundfläche wurde das Gitter aufgeteilt in ein rechteckiges Gitter und zwei radiale Gitter über einen Winkel von je 45° , um zu flache Winkel in der Zellmitte zu vermeiden und gleichzeitig die Anzahl der Zellen zu reduzieren.

Der Ursprung des lokalen Koordinatensystems liegt an der Unterkante der Basisschicht mit $z_{\text{Zelle}} = 0$. Die Schichtgrenze zwischen Basis und Filter befindet sich bei $z_{\text{Zelle}} = 0,40 \text{ m}$ und die Oberkante des Filters bei $z_{\text{Zelle}} = 0,80 \text{ m}$.

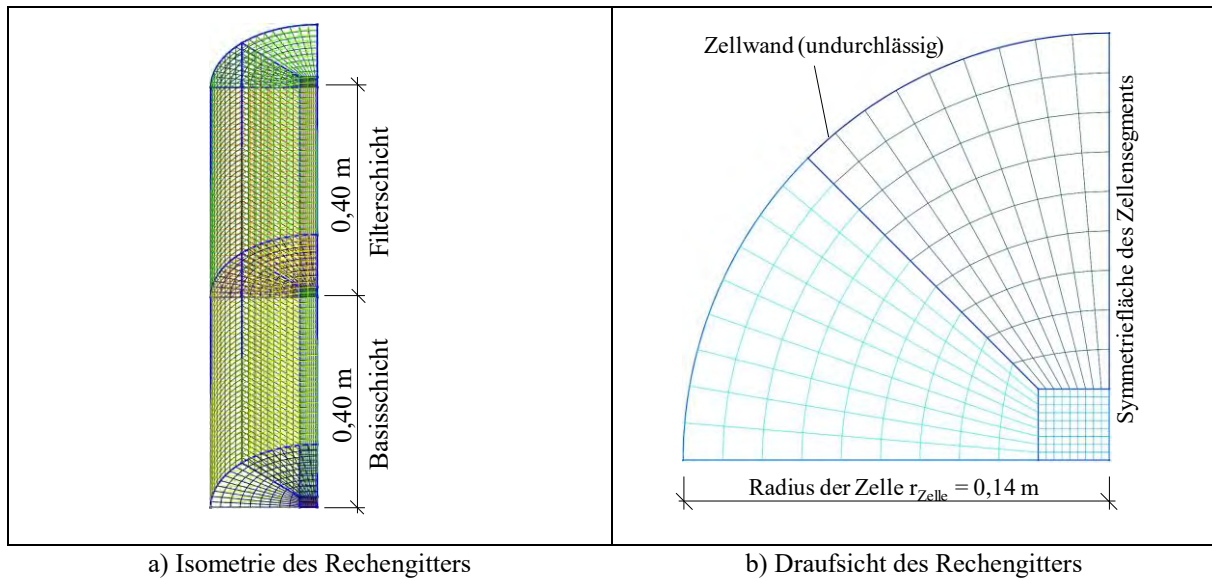


Abb. 4.5: Gitter der Versuchszelle mit a) isometrischer Darstellung und b) Draufsicht

Das Rechengitter hat einen großen Einfluss auf die Stabilität der Simulation durch den Gitterabstand und die Form der Zellen und damit auch auf die Genauigkeit der Ergebnisse. Die Reduzierung der Grundfläche des Rechengitters auf einen Kreisabschnitt führt zusätzlich zu einer Reduzierung der benötigten Rechenzeit, da die Hauptrichtung der Strömung in Richtung der Zellenachse verläuft und damit eine (eindimensionale) Betrachtung der Strömungsprozesse in einem Ausschnitt der Versuchszelle für die Fragestellung dieser Studie ausreichend ist. In Abbildung 4.6 sind hierzu drei Varianten der vertikalen Gitterauflösung vergleichend dargestellt.

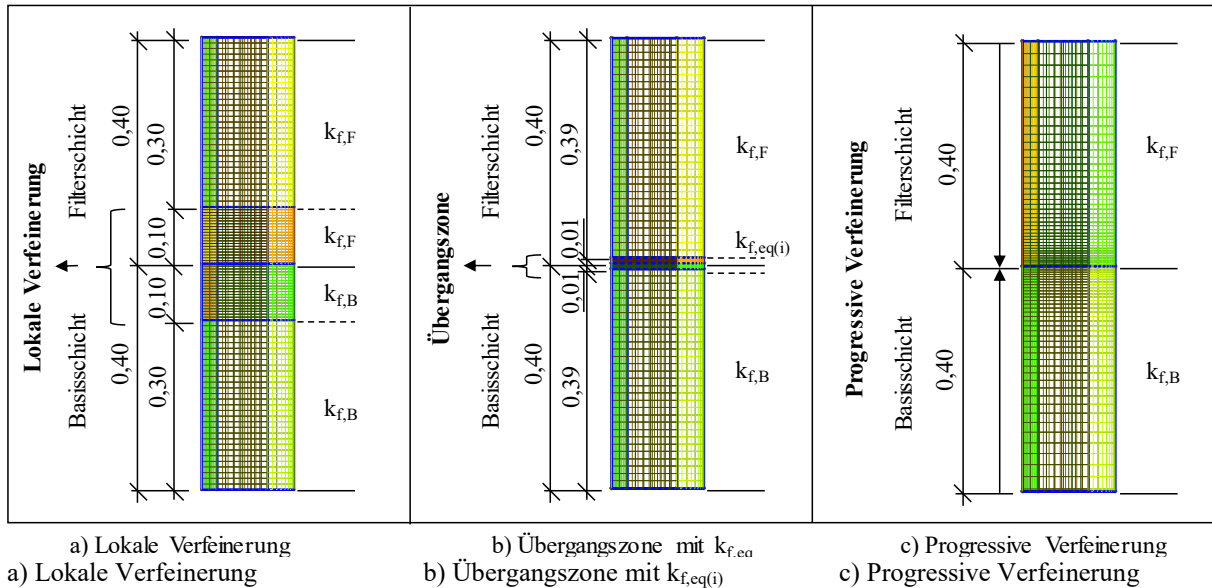


Abb. 4.6: Optimierungsschritte des Gitters mit a) Gitterverfeinerung der Zellabstände nur an der Schichtgrenze, b) Erstellung einer Übergangszone (mit äquivalenter Durchlässigkeit $k_{f,eq}$) ober- und unterhalb der Schichtgrenze, c) progressive Gitterverfeinerung in Richtung der Schichtgrenze (Dimensionen in m)

In den Varianten a) und c) wird in zwei Bereiche mit Basis und Filter unterschieden, denen die physikalischen Eigenschaften der Materialien zugewiesen werden. In Variante b) wird eine Übergangszone an der Schichtgrenze mit der äquivalenten Durchlässigkeit $k_{f,eq}$ zwischen den Durchlässigkeitsbeiwerten von Basis $k_{f,B}$ und Filter $k_{f,F}$ angelegt. Durch die feine Einteilung weiterer Zwischenschichten kann ein

allmählicher Übergang zwischen den Strömungsbedingungen in Basis- und Filterschicht erreicht werden, sodass die Stabilität und Konvergenz der Gleichungslösung deutlich verbessert werden.

Die Verfeinerung des Gitters allein führt nicht zu einer Verbesserung der Geschwindigkeitsverteilung, daher ist die Optimierung der Gleichungslösung an der Schichtgrenze, wie in Abschnitt 4.2.3 beschrieben, zusätzlich erforderlich. Aus diesem Grund wird die Variante b) (Abbildung 4.6) mit einer Übergangszone und mit einer schrittweisen Änderung des Durchlässigkeitsbeiwerts $k_{f,i}$ mit je 10 Stützstellen unter- und oberhalb der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filterschicht verwendet. Die Berechnung der äquivalenten Durchlässigkeitsbeiwerte erfolgt gemäß Gleichung 4.5 für jede einzelne Schicht. Der Abstand der einzelnen Schichten beträgt 1 mm, sodass eine Übergangsschicht von je 10 mm in der Basis- und Filterschicht entsteht.

Zusammenfassend hat sich im Vergleich der in Abbildung 4.6 dargestellten Gittervarianten die Variante b) mit einer Übergangszone als besonders geeignet herausgestellt. Durch eine Interpolation des äquivalenten Durchlässigkeitsbeiwerts $k_{f,eq}$ nach Gleichung 4.4 kann der Übergang zwischen den zwei Bodenschichten unterschiedlicher Durchlässigkeit verbessert werden. Dies führt auch zu einer Steigerung der Stabilität und der Konvergenz des Modells sowie zu einer deutlichen Verbesserung der Lösung für den Porenwasserdruck und der Filtergeschwindigkeit (siehe Abschnitt 4.5.2).

4.3.2 Rand- und Anfangsbedingungen

Die Versuchszelle wird dreidimensional und in der Grundfläche mit einem Viertel des Kreisquerschnitts abgebildet. Hierbei werden die inneren Schnittflächen als Symmetrieflächen und die äußere Fläche als Wand definiert. Die obere Fläche der Filterschicht und die untere Fläche der Basissicht werden mit einer Druckrandbedingung (Dirichlet) definiert. Zur Anwendung des Modells auf Wellenbewegungen in der Wechseldurchströmungsanlage wurde die Ermittlung des Wellendrucks in Abhängigkeit der Wellenparameter und Wassertiefe implementiert, sodass die äquivalenten Wellenparameter als Eingangswerte des numerischen Modells vorgegeben werden können. Die Berechnung des Wellendrucks erfolgt nach linearer Wellentheorie und kann jedoch auch nach anderen Wellentheorien direkt vorgegeben werden. Der hydrostatische Druck wird als Anfangsbedingungen aus der gewählten äquivalenten Wassertiefe h_{eq} ermittelt.

Die Implementierung der Druckrandbedingung mit der Vorgabe von Wellenparametern (Wellenhöhe H und Wellenperiode T in Wassertiefe h) berücksichtigt auch die Phasenverschiebung (Δt) und die Druckdämpfung zwischen der oberen und unteren Randbedingung mit dem Transmissionskoeffizient K_t . Die räumliche und zeitliche Diskretisierung der Randbedingungen ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

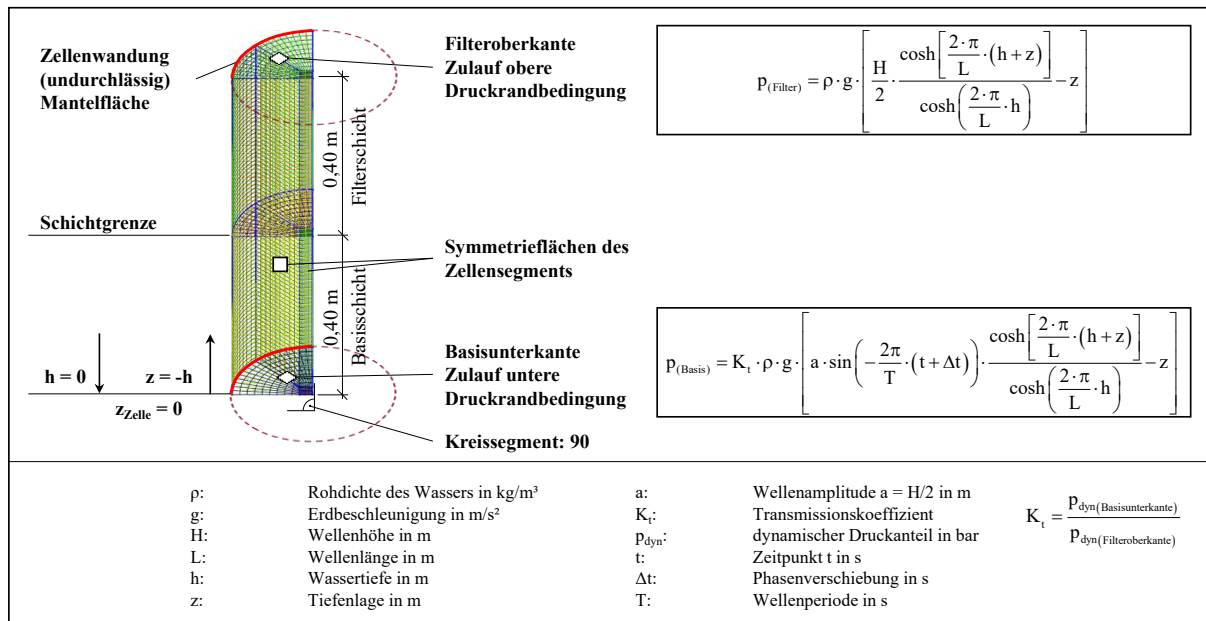


Abb. 4.7: Räumliche und zeitliche Diskretisierung der Anfangs- und Randbedingungen

Durch die Einführung des Transmissionskoeffizienten K_t als Verhältnis der Drücke zwischen oberer und unterer Randbedingung wird die Kalibrierung des Modells anhand der Laborexperimente ermöglicht. Die Transmission ist abhängig von der Höhenlage der Randbedingung beziehungsweise von den Schichtdicken des Basis- und Filtermaterials. Weiterhin wird der Transmissionskoeffizient K_t durch die Durchlässigkeiten der Schichten bestimmt. Durch Trägheitseffekte des Porenfluids und durch zeitliche Verzögerungen der Anlagensteuerung entsteht eine Phasenverschiebung Δt zwischen den Druckverläufen der oberen und unteren Randbedingung. Die Phasenverschiebung wird zur Kalibrierung des numerischen Modells anhand der Maximalwerte der oberen und unteren Randbedingung im Laborversuch ermittelt.

4.3.3 Ergebnisausgabe

Bei der Analyse der hydraulischen Prozesse wird auf die Filtergeschwindigkeit und die Porenwasserdruckverteilung (Druckgradienten) innerhalb der Versuchszelle fokussiert. Die Daten an den entsprechenden Positionen der Drucksensoren im Laborexperiment, wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben, werden mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Hz erfasst. Ein wesentlicher Vorteil des numerischen Modells gegenüber dem Laborversuch besteht in der hohen räumlichen Auflösung des Porenwasserdrucks, so dass eine exakte Bestimmung des maximalen hydraulischen Gradienten ermöglicht wird. Die hydraulischen Gradienten im Basis- und Filtermaterial werden aus der Zeitreihe des dynamischen Druckanteils des Porenwasserdrucks ermittelt.

4.4 Kalibrierung des numerischen Modells mit Labordaten

Mit Hilfe der im Laborversuch ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte für das Basismaterial $k_{f,B}$ und Filtermaterial $k_{f,F}$ wird das numerische Modell kalibriert. Die Qualität der Kalibrierung des numerischen Modells wird im Vergleich zum häufig verwendeten Ansatzes nach Hazen (siehe Gleichung 2.18 in Abschnitt 2.2.3) und zu den Ergebnissen der Laborexperimente bewertet. Der empirische Ansatz nach Hazen eignet sich nach Chapuis (2012) für den Anwendungsbereich dieser Studie und dient zur Einordnung der Ergebnisse aus den Laborexperimenten. Dazu sind die Durchlässigkeitsbeiwerte der Basis- und Filterschicht sowie der Gesamtprobe in Tabelle 4.2 mit den Abweichungen (Gleichung 4.6) zwischen theoretischem Ansatz, Laborergebnissen und den Werten der Kalibrierung im numerischen Modell zusammengefasst.

$$\Delta = \text{ABS} \left(\frac{k_{f,\text{exp}} - k_{f,i}}{k_{f,\text{exp}}} \cdot 100\% \right) \quad (4.6)$$

Die Abweichung Δ ergibt sich aus dem gemessenen Wert im Laborexperiment $k_{f,\text{exp}}$ und dem ermittelten Wert $k_{f,i}$ mit dem empirischen Ansatz nach Hazen beziehungsweise aus der numerischen Modellierung.

Tab. 4.2: Kalibrierung des numerischen Modells und Vergleich der Durchlässigkeitsbeiwerte mit den Abweichungen zu den Durchlässigkeitsbeiwerten k_f nach Hazen und aus den Laborexperimenten

Filterkonfiguration			F1A2	F1A2	F1A3	F1A3	F1B1	F1C1	F2A1	F2A2
Hydraulische Parameter	Äquivalente Wellenhöhe H_{eq}	m	3,83	9,21	6,26	9,63	9,58	9,27	3,78	7,43
	Äquivalente Wellenperiode T_{eq}	s	9,52	9,52	9,52	9,52	9,52	9,52	9,52	7,24
	Äquivalente Wassertiefe h_{eq}	m	25,79	25,81	25,82	25,81	25,79	25,83	25,77	25,78
Durchlässigkeitsbeiwert k_{fB}	Basis	Ansatz nach Hazen	m/s	$5,29 \cdot 10^{-4}$	$5,29 \cdot 10^{-4}$	$5,29 \cdot 10^{-4}$	$5,29 \cdot 10^{-4}$	$5,29 \cdot 10^{-4}$	$5,29 \cdot 10^{-4}$	$5,29 \cdot 10^{-4}$
		Laborversuch	m/s	$7,15 \cdot 10^{-4}$	$6,71 \cdot 10^{-4}$	$7,84 \cdot 10^{-4}$	$7,79 \cdot 10^{-4}$	$6,10 \cdot 10^{-4}$	$5,86 \cdot 10^{-4}$	$7,96 \cdot 10^{-4}$
		Simulation (Kalibrierung)	m/s	$6,05 \cdot 10^{-4}$	$6,35 \cdot 10^{-4}$	$7,00 \cdot 10^{-4}$	$6,84 \cdot 10^{-4}$	$6,00 \cdot 10^{-4}$	$5,95 \cdot 10^{-4}$	$7,40 \cdot 10^{-4}$
	Abw. Δ	(Hazen) Ansatz/Labor	%	26,0	21,1	32,5	32,0	13,3	9,8	33,6
		Labor/Simulation	%	18,2	5,6	12,0	13,8	6,3	1,4	7,6
Durchlässigkeitsbeiwert k_{fF}	Filter	Ansatz nach Hazen	m/s	$7,06 \cdot 10^{-3}$	$7,06 \cdot 10^{-3}$	$6,53 \cdot 10^{-3}$	$6,53 \cdot 10^{-3}$	$8,13 \cdot 10^{-2}$	$3,48 \cdot 10^{-3}$	$3,93 \cdot 10^{-2}$
		Laborversuch	m/s	$1,73 \cdot 10^{-2}$	$1,13 \cdot 10^{-2}$	$1,99 \cdot 10^{-2}$	$1,83 \cdot 10^{-2}$	$1,18 \cdot 10^{-2}$	$3,83 \cdot 10^{-3}$	$2,43 \cdot 10^{-2}$
		Simulation (Kalibrierung)	m/s	$1,69 \cdot 10^{-2}$	$1,19 \cdot 10^{-2}$	$9,60 \cdot 10^{-3}$	$9,33 \cdot 10^{-3}$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	$4,26 \cdot 10^{-3}$	$2,23 \cdot 10^{-2}$
	Abw. Δ	(Hazen) Ansatz/Labor	%	59,3	37,7	67,3	64,3	589,6	9,3	61,8
		Labor/Simulation	%	24,0	13,5	0,2	4,4	1,7	23,4	61,9
Durchlässigkeitsbeiwert $k_{f,eq}$	Gesamtprobe	Ansatz nach Hazen	m/s	$9,84 \cdot 10^{-4}$	$9,84 \cdot 10^{-4}$	$9,79 \cdot 10^{-4}$	$9,79 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$9,18 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-3}$
		Laborversuch	m/s	$1,37 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	$1,38 \cdot 10^{-3}$	$1,38 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	$1,21 \cdot 10^{-3}$	$1,39 \cdot 10^{-3}$
		Simulation (Kalibrierung)	m/s	$1,24 \cdot 10^{-3}$	$1,21 \cdot 10^{-3}$	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$1,21 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-3}$
	Abw. Δ	(Hazen) Ansatz /Labor	%	28,3	26,8	29,1	28,9	22,0	23,8	24,9
		Labor/Simulation	%	11,2	11,1	12,2	12,3	11,8	7,0	14,0

Vergleich empirischer Ansatz/Laborversuch: Im Vergleich zwischen dem empirischen Ansatz nach Hazen (siehe Gleichung 2.18, Abschnitt 2.2.3) zur Ermittlung der Durchlässigkeitsbeiwerte (anhand des Korndurchmessers d_{10} und der Ungleichförmigkeit d_{60}/d_{10}) und den Ergebnissen im Laborexperiment zeigen sich um 9,8 % bis 33,6 % höhere Durchlässigkeitsbeiwerte im Basismaterial. Im Filter weichen die Durchlässigkeitsbeiwerte aus dem Ansatz nach Hazen zu den Laborversuch um -590 % bis +67 % sehr deutlich ab. Diese Abweichungen entstehen durch die Abhängigkeit der Durchlässigkeit im Basis- und Filtermaterial von der äquivalenten Durchlässigkeit der Gesamtprobe, wodurch die Filtergeschwindigkeit (der in Reihe liegenden Schichten) bestimmt wird. Weiterhin führt die Turbulenz der Porenwasserströmung im Filter und die Trägheit des Porenwassers bei zunehmender Wellenhöhe zu einem erhöhten Fließwiderstand im Vergleich zu laminarer Strömung und damit zu einer geringeren Durchlässigkeit im Filter. Es bestehen Unsicherheiten des empirischen Ansatzes nach Hazen (siehe Gleichung 2.18 in Abschnitt 2.2.3) in Bezug auf die dynamische Porengeometrie, da die Bodenmatrix durch den Porenwasserdruck elastisch und plastisch verformt wird. Weiterhin führen turbulente und instationäre Strömungsprozesse mit Wechsel der Strömungsrichtung zu Abweichungen, welche im Durchlässigkeitsbeiwert nicht berücksichtigt sind. Aus diesem Grund dienen die Durchlässigkeitsbeiwerte mit dem Ansatz nach Hazen lediglich zur Einordnung der Ergebnisse aus dem Laborexperiment und der numerischen Simulation.

Vergleich Laborversuch/numerische Simulation: Die Ergebnisse der numerischen Simulation erreichen mit Abweichungen der Durchlässigkeit in der Gesamtprobe von 7 % bis 14 % eine sehr gute Übereinstimmung mit den Laborexperimenten. Die größte Abweichung der Durchlässigkeiten wird in der Filterschicht mit 61,9 % erreicht, da die nichtlinearen Effekte (Turbulenz, Massenträgheit) im Filter durch das numerische Modell linearisiert werden. Die Zunahme der hydraulischen Belastung durch die Steigerung der Wellenhöhe um 240 % (von $H = 3,83$ m auf 9,21 m) führt zu einer Abnahme der Durchlässigkeit in der Filterschicht (F1A2) um 7,2 %. Für die Durchlässigkeit der gesamten Probe und für die Filtergeschwindigkeit haben diese Prozesse im genannten Beispiel mit 1,5 % eine relativ geringe Auswirkung. Eine detaillierte Sensitivitätsanalyse zum Einfluss dieser Änderungen auf den hydraulischen Gradienten wird in Abschnitt 4.6 durchgeführt.

Die Kalibrierung des Modells anhand der Durchlässigkeitsbeiwerte des Basis- und Filtermaterials führt zu einer guten Anpassung mit geringen Abweichung zum Laborexperiment. Aufgrund der verbesserten Mess- und Regeltechnik der Versuchsanlage wurde (im Vergleich zwischen den beiden ähnlichen Filterkonfigurationen F1A2 und F1A3) eine bessere Übereinstimmung der Durchlässigkeitsbeiwerte erzielt.

Der Vergleich der Durchlässigkeitsbeiwerte aus dem empirischen Ansatz nach Hazen und dem Laborexperiment zeigen für das Filtermaterial im Vergleich zum Basismaterial relativ hohe Abweichungen von bis zu 590 % durch das hohe Abstandsverhältnis $d_{15F}/d_{85B} = 19,9$ und die relativ hohe Ungleichförmigkeit $d_{60F}/d_{10F} = 5,5$ des Filtermaterials F1B1. Die Ergebnisse der Laborversuche zeigen im Vergleich zu der numerischen Simulation relativ gute Übereinstimmungen der Durchlässigkeitsbeiwerte der Gesamtprobe mit Abweichungen von 7 % bis 14 %.

Die Eignung des linearisierten Modells zur Abbildung der Strömung im Filteraufbau und des maßgebenden hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial ist vor der Anwendung zu prüfen. Zur Durchführung von Sensitivitäts- und Parameterstudien wird dazu die Validierung des kalibrierten Modells anhand der Laborexperimente durchgeführt.

4.5 Validierung des geotechnischen Modells mit Labordaten

Die Verifikation der Algorithmen im numerischen Modell und Untersuchungen der numerischen Unsicherheiten wurden nach El Safti (2015) und Alcérrec Huerta (2014) durchgeführt. Weiterhin wurde das Modell *geotechFoam* in den Untersuchungen nach El Safti (2015) und Alcérrec Huerta (2014) anhand von großmaßstäblichen Modellversuchen im GWK (Oumeraci et al., 2010 und Kudella et al., 2006) und in kleinmaßstäblichen Versuchen (Liebisch, 2015) validiert.

Das numerische Modell *geotechFoam* wird für die Durchführung von Parameterstudien in dieser Studie mit den Ergebnissen der Laboruntersuchungen mit der Wechseldurchströmungsanlage validiert. Dadurch wird die Eignung des Modells für die weiteren numerischen Untersuchungen und für die Modellbildung durch Parameterstudien bestimmt. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf der Validierung der Porenwasserdruckverteilung und der daraus resultierenden hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze. In den folgenden Abschnitten werden die hydraulischen und geotechnischen Randbedingungen zur Durchführung der Validierung beschrieben. Die Validierung wird anhand (i) der räumlichen Verteilung des Porenwasserdrucks, (ii) der Zeitreihen des Porenwasserdrucks und des hydraulischen Gradienten, sowie (iii) der Gegenüberstellung von Filtergeschwindigkeit und hydraulischem Gradienten dargestellt.

Zur Bewertung der Ergebnisse der numerischen Simulation anhand der Laborexperimente wird der relative Fehler des maximalen hydraulischen Gradienten $\Delta i_{\max(j,i)}$, des maximalen Porenwasserdrucks $\Delta p_{\max(i)}$ und der maximalen Filtergeschwindigkeit $\Delta v_{f,\max}$ nach Gleichung 4.7 verwendet:

$$\Delta x = \frac{x_{\text{exp}} - x_{\text{num}}}{x_{\text{exp}}} \cdot 100\% \quad (4.7)$$

mit dem relativen Fehler Δx , dem gemessenen Wert im Laborexperiment x_{exp} und dem ermittelten Wert aus der numerischen Modellierung x_{num} .

Damit ergibt sich der relative Fehler des maximalen hydraulischen Gradienten $\Delta i_{\max(j,i)}$ in Prozent zwischen der Höhenlage j und i aus dem gemessenen Wert $i_{\text{exp}(j,i)}$ und dem simulierten Wert $i_{\text{num}(j,i)}$. Auf gleiche Weise wird die Abweichung zwischen den gemessenen und simulierten Maximalwerten des Porenwasserdrucks ($\Delta p_{\max(i)}$) und der Filtergeschwindigkeit ($\Delta v_{f,\max}$) ermittelt.

4.5.1 Hydraulische und geotechnische Randbedingungen

Zur Validierung des numerischen Modells werden die maximalen hydraulischen Belastungen ohne Materialbewegung der Filterkonfigurationen F1A2, F1A3, F1B1, F1C1, F2A1 und F1A2 verwendet (siehe Abschnitt 3.2.2). Diese Materialien repräsentieren Filter mit sehr geringem Abstandsverhältnis und geringer Ungleichförmigkeit bis hin zu großem Abstandsverhältnis $d_{15F}/d_{85B} = 2,3$ bis $19,9$ und relativ großer Ungleichförmigkeit $d_{60F}/d_{10F} = 2,3$ bis $6,6$ und bieten damit eine große Bandbreite der Durchlässigkeit des Filters $k_{f,F} = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ bis $7 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ (siehe Abschnitt 3.2.2). Es werden äquivalente Wellenhöhen von $H_{\text{eq}} = 3,83 \text{ m}$ bis $9,63 \text{ m}$ mit äquivalenten Wellenperioden $T_{\text{eq}} = 7,25 \text{ s}$ und $9,52 \text{ s}$ in einer äquivalenten Wassertiefe von $h_{\text{eq}} = 25,8 \text{ m}$ gewählt. Die hydraulischen Belastungen liegen hierbei unterhalb der kritischen hydraulischen Belastung der jeweiligen Filterkonfiguration und an der Obergrenze im stabilen Filterzustand. Hierdurch werden kontrollierte Bedingungen *ohne Materialtransport* mit der höchstmöglichen Messgenauigkeit für die Validierung erreicht. Zur Bewertung der numerischen Ergebnisse werden die Zeitreihen des Porenwasserdrucks sowie die Maximalwerte des hydraulischen Gradi-

enten im Filter- und Basismaterial den Ergebnissen der hydraulischen Laborexperimente gegenübergestellt. Die hydraulischen und geotechnischen Randbedingungen werden wie folgt gewählt (siehe auch Abschnitt 3.2):

Tab. 4.3: Hydraulische und geotechnische Parameter zur Validierung des numerischen Modells

Äquivalente (Wellen-) Parameter			Filterkonfiguration	Geotechnische Parameter						
				Filter			Basis			Filter/Basis
Wellenhöhe	Wellenperiode	Wassertiefe		Ungleichförmigkeit	Durchlässigkeit	Porosität	Ungleichförmigkeit	Durchlässigkeit	Porosität	Abstandsverhältnis
H _{eq}	T _{eq}	h _{eq}		d _{60F} /d _{10F}	k _{f,F}	n _{F,F}	d _{60B} /d _{10B}	k _{f,B}	n _{S,B}	d _{15F} /d _{85B}
m	s	m		-	10 ⁻² m/s	-	-	10 ⁻⁴ m/s	-	-
3,83	9,52	25,8	F1A2	5,9	2,3	0,4	1,3	6,1	0,4	4,5
9,21	9,52	25,8	F1A2	5,9	1,3	0,4	1,3	6,4	0,4	4,5
6,26	9,52	25,8	F1A3	6,6	2,0	0,4	1,3	7,0	0,4	4,3
9,63	9,52	25,8	F1A3	6,6	1,8	0,4	1,3	6,8	0,4	4,3
9,58	9,52	25,8	F1B1	5,5	1,2	0,4	1,3	6,0	0,4	19,9
9,27	9,52	25,8	F1C1	2,3	0,5	0,4	1,3	6,0	0,4	2,3
3,78	9,52	25,8	F2A1	4,8	1,5	0,4	1,3	7,4	0,4	8,3
7,43	7,25	25,8	F2A2	2,5	1,4	0,4	1,3	7,2	0,4	9,9

4.5.2 Vergleich mit gemessenen Zeitreihen des (welleninduzierten) Porenwasserdrucks

Die Verteilung des Drucks wird im numerischen Modell an den Positionen der Drucksensoren im hydraulischen Laborversuch dargestellt. Die Höhenlagen sind von der Filteroberkante (Level 1), in der Mitte der Filterschicht bei 20 cm (Level 3), an der Schichtgrenze zwischen Basis und Filter (Level 5), in der Mitte der Basisschicht bei 60 cm (Level 7) und an der Unterkante der Basisschicht, in einer Tiefe von 80 cm (Level 9), dargestellt.

Neben der räumlichen Verteilung des Porenwasserdrucks geben die Zeitreihen des Porenwasserdrucks Aufschluss über die Phasenverschiebung und Zeitpunkte der Maxima. Dazu sind in Abbildung 4.8 die Zeitreihen des Porenwasserdrucks am oberen Rand der Filterschicht (p_1), am unteren Rand der Basisschicht (p_9), an der Schichtgrenze zwischen Basis und Filter (p_5) und 10 cm unterhalb der Schichtgrenze (p_6) dargestellt. Weiterhin sind die Zeitreihen der Filtergeschwindigkeit v_f aus der numerischen Simulation dem Laborexperiment gegenübergestellt.

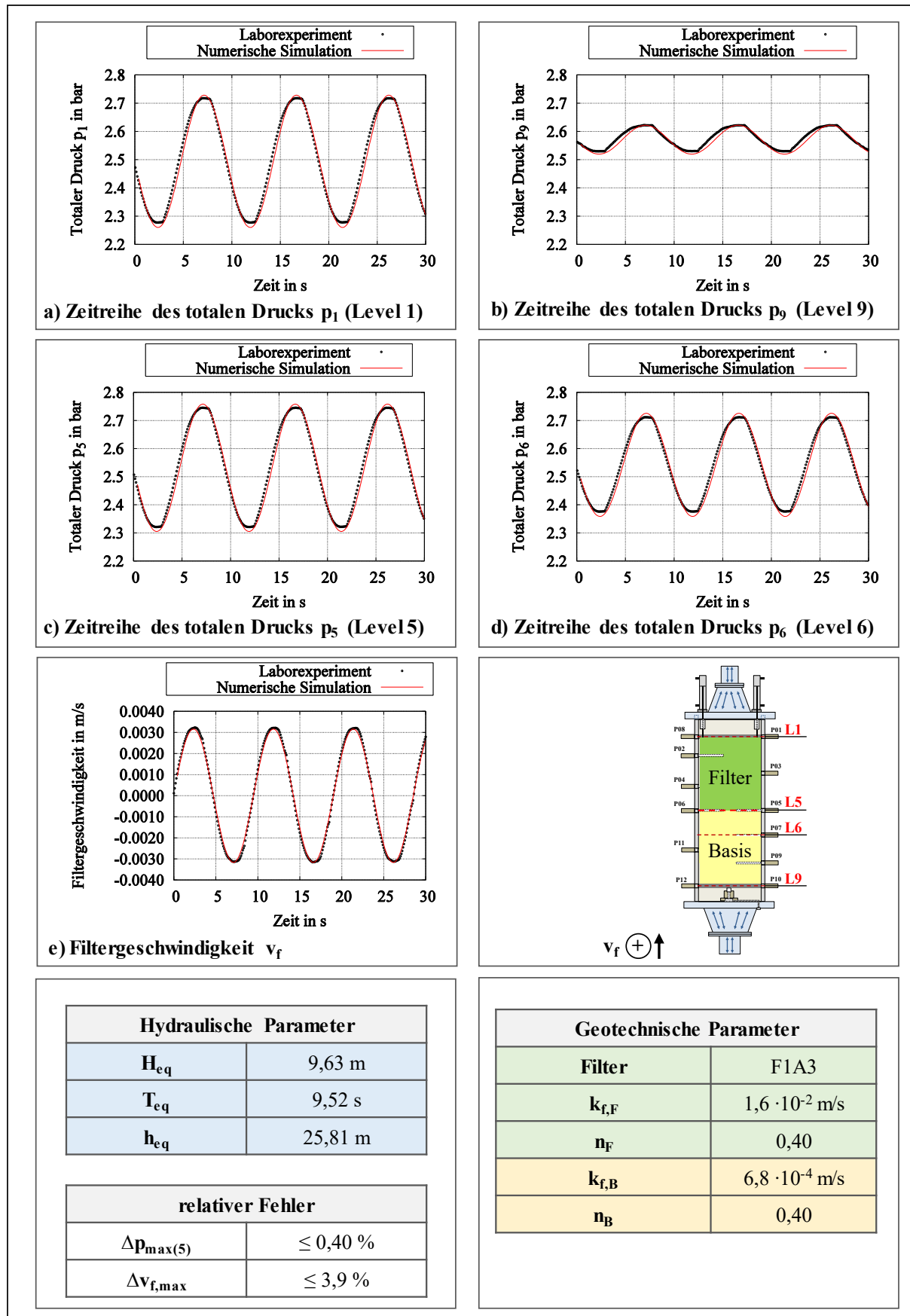


Abb. 4.8: Validierung des numerischen Modells *geotechFoam* anhand des totalen Porenwasserdrucks $p_{total,i}$ mit dem relativen Fehler gemäß Gleichung 2.45 in der Basis- und Filterschicht (Filterkonfiguration F1A3)

In Abbildung 4.8 ist der Verlauf des totalen Drucks, bestehend aus dem hydrostatischen und hydrodynamischen Druckanteil, dargestellt. Dieser Druckverlauf ergibt sich aus der Randbedingung des numerischen Modells, ermittelt nach linearer Wellentheorie in Abhängigkeit der äquivalenten Wassertiefe h_{eq} und der äquivalenten Wellenparameter (Wellenhöhe H_{eq} und Wellenperiode T_{eq}). Die Randbedingungen im numerischen Modell werden entsprechend der Randbedingungen im Laborexperiment basierend auf der linearen Wellentheorie ermittelt. Aus diesem Grund wird im hydraulischen Experiment und im numerischen Modell eine sehr gute Übereinstimmung des Porenwasserdrucks an den Modellrändern erreicht (relativer Fehler $\Delta p_{\max(1/9)} = 0,1 \text{ \%}$ bis $3,4 \text{ \%}$). Ebenfall ergeben sich an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filterschicht im Wellenberg und im Wellental Abweichungen in gleicher Größenordnung (relativer Fehler an der Schichtgrenze $\Delta p_{\max(5)} = 0,1 \text{ \%}$ bis $3,3 \text{ \%}$), die durch die Systemgrenzen der Versuchsanlage (Druckabfall bei hohem Volumenstrom im Druckluftsystem) entstehen. Im Wellental zeigt sich, dass der schnelle Druckabbau gegenüber dem atmosphärischen Druck (durch Öffnen der Ventile im Druckregler) zwar nicht exakt, jedoch hinreichend genau erreicht wird. In den weiteren Höhenlagen im Filter bis zur Schichtgrenze zwischen Basis und Filter (Level 5) wird die Amplitude des dynamischen Drucks nur sehr geringfügig gedämpft. Gleichzeitig ergibt sich eine Phasenverschiebung zwischen Filteroberkante und -unterkante von $\Delta t \approx 0,35 \text{ s}$. Eine größere Druckdämpfung stellt sich im weiteren Verlauf zwischen der Schichtgrenze (Level 5) und der Unterkante des Filtermaterials (Level 9) ein. Eine Phasenverschiebung von $\Delta t \approx 0,35 \text{ s}$ wird zwischen Level 5 und Level 9 und eine Phasenverschiebung von $\Delta t \approx 0,70 \text{ s}$ wird zwischen Filteroberkante (Level 1) und Basisunterkante (Level 9) erreicht. Der Transmissionskoeffizient des Drucks K_t sowie die Phasenverschiebung Δt zwischen Filteroberkante und Basisunterkante werden für die untere Randbedingung im numerischen Modell aus den hydraulischen Laborversuchen für jeden einzelnen Versuch ermittelt. Beide Parameter sind von den Materialeigenschaften der Probe abhängig und können durch die Abhängigkeit der Filtergeschwindigkeit von der Durchlässigkeit nur in Laborversuchen ermittelt werden. Durch diesen Ansatz ist es möglich die Dicke der Basisschicht auf 40 cm zu begrenzen und die Dämpfung am unteren Rand zu berücksichtigen. Aus den Zeitreihen des Porenwasserdrucks werden im nächsten Schritt (Abschnitt 4.5.3) die hydraulischen Gradienten im Basis- und Filtermaterial abgeleitet.

Durch den Vergleich der Zeitreihen des dynamischen Drucks aus der numerischen Simulation mit den hydraulischen Laborexperimenten konnten relativ gute Übereinstimmungen des Druckverlaufs an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filterschicht aufgezeigt werden (relativer Fehler $\Delta p_{\max(5)} = 0,1 \text{ \%}$ bis $3,3 \text{ \%}$). Gleichzeitig geben die geringeren Abweichungen des dynamischen Drucks Aufschluss über die Grenzen der Anlage insbesondere in Bezug auf den schnellen Druckabbau im Wellental. Die Druckdämpfung sowie die Phasenverschiebung des dynamischen Druckverlaufs konnten sehr gut im numerischen Modell abgebildet werden, sodass mit dem so validierten Modell weitere Untersuchungen zur Filterströmung ohne Materialtransport durchgeführt werden können.

4.5.3 Vergleich mit den experimentellen hydraulischen Gradienten als Zeitreihe und als Funktion der Filtergeschwindigkeit

Der hydraulische Gradient an der Schichtgrenze zwischen Filter- und Basisschicht ist die maßgebende Größe für die hydraulische Stabilität des Kornfilters. Aus diesem Grund ist die Validierung des Modells anhand des hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ an der Schichtgrenze bis 10 cm unterhalb zweckmäßig. Die Validierung des numerischen Modells *geotechFoam* erfolgt mit der Zeitreihe der hydraulischen Gradienten $i_{9,1}$, $i_{5,1}$, $i_{9,5}$ und $i_{6,5}$ sowie mit der Gegenüberstellung der Filtergeschwindigkeit v_f mit den hydraulischen Gradienten $i_{5,1}$ im Filter und $i_{9,5}$ im Basismaterial. Die Ergebnisse des numerischen Modells sind den Daten der Laborexperimente in Abbildung 4.9 gegenübergestellt.

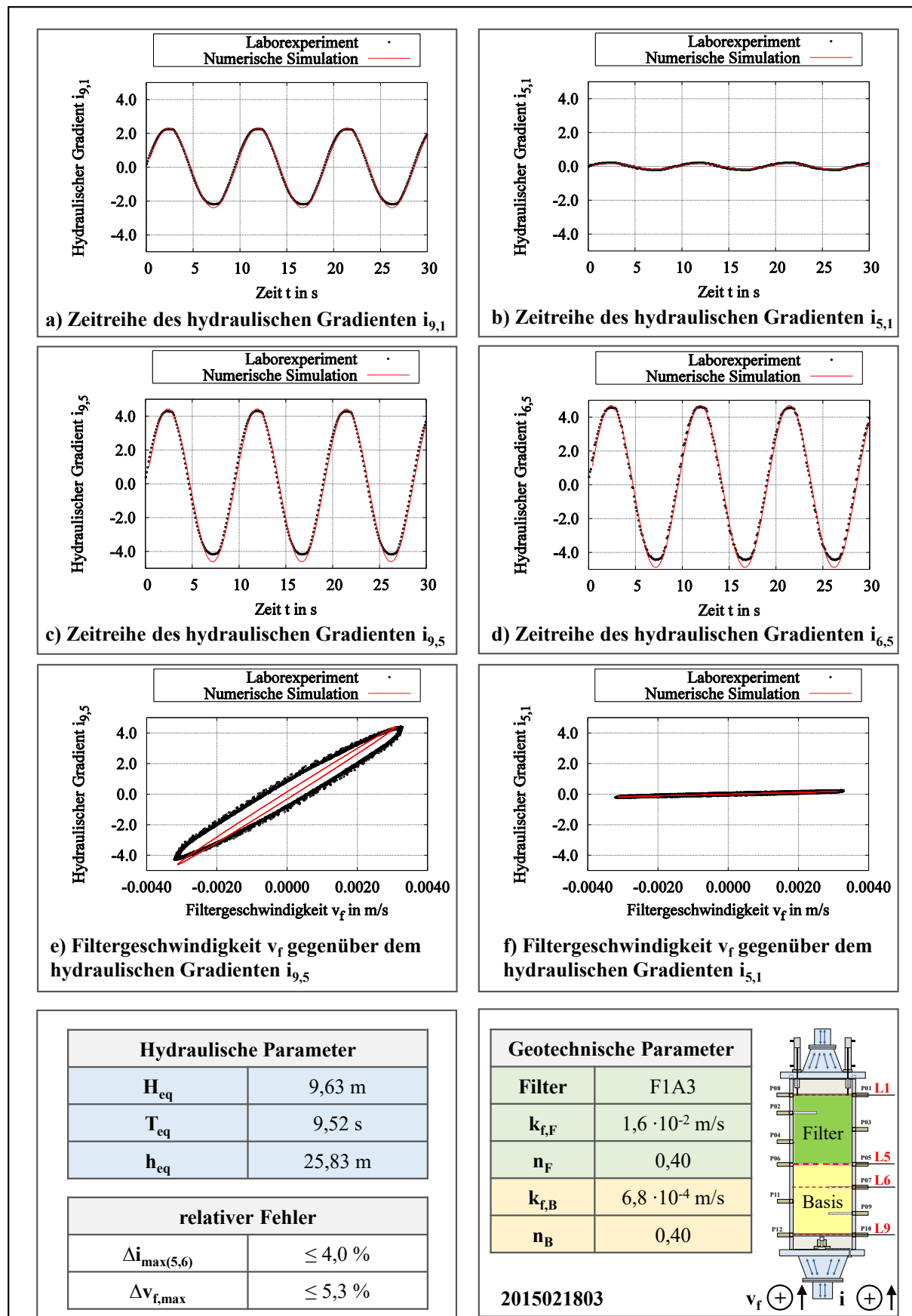


Abb. 4.9: Validierung des numerischen Modells *geotechFoam* anhand der hydraulischen Gradienten $i_{j,i}$ und der Filtergeschwindigkeit v_f mit dem relativen Fehler gemäß Gleichung 2.45 (Filterkonfiguration F1A3)

Die Amplitude des Porenwasserdrucks und damit auch des hydraulischen Gradienten werden relativ gut abgebildet, es sind jedoch kurzzeitige Plateaubildungen am Wellenberg und -tal im Laborexperiment erkennbar, welche durch die Anlagensteuerung entstehen und in der numerischen Simulation nicht abgebildet werden. Im Bereich der Schichtgrenze und 10 cm unterhalb $i_{6,5}$ sind Abweichungen der Amplitude des hydraulischen Gradienten zwischen der numerischen Simulation und den Laborexperimenten zu erkennen. Bei der Vergleichsanalyse der hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filterschicht werden ausreichend gute Übereinstimmungen mit relativen Fehlern $\Delta i_{\max(6,5)} = 3,3 \%$ bis $18,2 \%$ erzielt. Diese Abweichungen entstehen durch die Unstetigkeit in der Gleichungslösung im Bereich der beiden angrenzenden Schichten (Level 5). Die Entstehung der Unstetigkeit wurde in Abschnitt 4.2.3 näher erläutert. Weiterhin unterliegt die Ermittlung der hydraulischen Gradienten aus den Laborexperimenten der Unsicherheit aus der Messgenauigkeit sowie der Berechnung des dynamischen Druckanteils. Diese Unsicherheiten konnten durch den Einsatz verbesserter Drucksensoren in der zweiten Phase der Laborexperimente reduziert werden.

Ebenfalls entstehen relative Abweichungen ($\Delta i_{\max(5,1)} = 4,6 \%$ bis $37,9 \%$) bei den hydraulischen Gradienten zwischen der Schichtgrenze und der Filteroberkante ($i_{5,1}$), da die nichtlinearen Einflüsse des größeren Filtermaterials im linearisierten Modell nur annähernd abgebildet werden. Die hydraulischen Gradienten und die Filtergeschwindigkeiten aus der numerischen Simulation und den Laborexperimenten sind im Vergleich, zusammen mit den relativen Fehlern (nach Gleichung 2.45) in Tabelle 4.4 zusammengefasst.

Tab. 4.4: Validierung des numerischen Modells anhand der hydraulischen Gradienten und der Filtergeschwindigkeit im Laborexperiment

Filter- konfiguration	Numerische Simulation					Laborexperiment					relativer Fehler	
	$i_{\max(9,1)}$	$i_{\max(5,1)}$	$i_{\max(6,5)}$	$i_{\max(9,5)}$	$v_{f,\max}$	$i_{\max(9,1)}$	$i_{\max(5,1)}$	$i_{\max(6,5)}$	$i_{\max(9,5)}$	$v_{f,\max}$	$i_{\max(6,5)}$	$v_{f,\max}$
	-	-	-	-	m/s	-	-	-	-	m/s	%	%
<i>F1A2</i>	1.069	0.057	2.208	2.135	0.0013	1.024	0.077	2.668	1.975	0.0013	17.3	2.4
<i>F1A2</i>	2.418	0.227	4.895	4.725	0.0030	2.425	0.245	5.932	4.609	0.0030	17.5	0.5
F1A3	1.527	0.105	3.123	3.023	0.0021	1.573	0.150	2.995	3.010	0.0023	4.3	6.1
F1A3	2.304	0.177	4.693	4.543	0.0031	2.364	0.238	4.515	4.503	0.0033	4.0	5.3
<i>F1C1</i>	2.454	0.517	4.688	4.493	0.0027	1.733	0.542	5.728	2.926	0.0027	18.2	0.6
F2A2	0.989	0.098	1.997	1.927	0.0014	1.086	0.158	1.905	2.030	0.0015	4.8	7.0
<i>F1B1</i>	2.543	0.246	5.139	4.962	0.0030	2.597	0.306	6.233	4.891	0.0027	17.6	11.1
F2A1	1.056	0.099	2.135	2.062	0.0015	1.081	0.147	2.208	2.044	0.0017	3.3	11.6

Die größte Abweichung der Maximalwerte des hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze beträgt gemäß Gleichung 4.7 $\Delta i_{\max(6,5)} \leq 18,2 \%$. Im Basismaterial beträgt die Abweichung $\Delta i_{\max(9,5)} \leq 8,1 \%$ und im Filtermaterial $\Delta i_{\max(5,1)} \leq 37,9 \%$. In der Gegenüberstellung der Filtergeschwindigkeit v_f und des hydraulischen Gradienten $i_{9,5}$ ist eine deutlich geringere Filtergeschwindigkeit aus dem numerischen Modell im Vergleich zu den Laborversuchen festzustellen.

Im Vergleich der Versuchsphasen kann festgestellt werden, dass die Validierung der zweiten Versuchsphase (mit den Filterkonfigurationen F1A3, F2A1, F2A2) gegenüber der ersten Phase (mit den Filterkonfigurationen F1A2, F1C1 und F1B1) deutlich bessere Ergebnisse liefert. So konnte durch neue Drucksensoren mit höherer Messgenauigkeit und einer verbesserten Regeltechnik der Versuchsanlage der relative Fehler zwischen Laborexperiment und numerischer Simulation von maximal 18,2 % auf maximal 4,8 % reduziert werden (siehe Tabelle 4.4).

Die errechneten Zeitreihen des Porenwasserdrucks und die daraus abgeleiteten hydraulischen Gradienten in der numerischen Simulation konnten die Ergebnisse der Laborversuche sehr gut nachbilden. Die Verläufe der Zeitreihen sowie die Maximalwerte erreichen eine hohe Genauigkeit und verdeutlichen die Eignung des numerischen Modells für Parameterstudien. Es wird auch deutlich, dass das Modell nach Darcy aufgrund der relativ geringen äquivalenten Durchlässigkeit der Gesamtprobe ($k_{f,eq} \leq 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) sehr gute Ergebnisse liefert. Eine Steigerung der Genauigkeit wird durch die Kalibrierung des Modells mit den vorhandenen Durchlässigkeitsbeiwerten aus den hydraulischen Experimenten ermöglicht, sodass der relative Fehler des hydraulischen Gradienten der Filterkonfigurationen F1A3, F2A1, F2A2 maximal $\Delta i_{\max(6,5)} = 4,8 \%$ beträgt. Durch den Vergleich der numerischen Ergebnisse mit den hydraulischen Laborexperimenten ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Die Randbedingungen des dynamischen Drucks unter fortschreitenden Wellen im Laborexperiment werden durch die Randbedingungen im Modell sehr gut abgebildet.
- Der volldynamischen Ansatz nach Biot mit dem gekoppelten Darcy-Modell liefert aufgrund der relativ geringen Filtergeschwindigkeiten im Basis- und Filtermaterial gute Ergebnisse mit einem geringen relativen Fehler $\Delta i_{\max(6,5)} \leq 4,8 \%$ (Filterkonfiguration F1A3, F2A1, F2A2) und ist damit für die Durchführung der Parameterstudien geeignet.
- Das linear elastische Modell ist für den stabilen Zustand des Filters geeignet, da keine plastische Verformung durch Bodenspannungen oder Erosionsprozesse zur Ermittlung des maßgebenden hydraulischen Gradienten betrachtet wird.

4.6 Sensitivitätsanalyse und Programm der numerischen Parameterstudie

In Hinblick auf die Modelleffekte, Randbedingungen und das dynamische Verhalten der Probe in der Wechseldurchströmungsanlage werden Sensitivitätsanalysen und Parameterstudien mit dem numerischen Modell *geotechFoam* durchgeführt. Der Fokus der Sensitivitätsanalyse liegt dabei auf folgenden Prozessen:

- Einfluss der Anlagensteuerung und der Randbedingungen in der Wechseldurchströmungsanlage auf den maßgebenden hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze
- Dämpfung des dynamischen Porenwasserdrucks in der Basisschicht
- Entwicklung des hydraulischen Gradienten ohne Materialbewegung (stabiler Filterzustand)
- Interaktion der hydraulischen Prozesse im Basis- und Filtermaterial

Mit Hilfe einer systematischen Parameterstudie werden folgende Zusammenhänge im stabilen Filterzustand untersucht:

- Zusammenhang zwischen äquivalenten Wellenparametern (H_{eq} und T_{eq} in der Wassertiefe h_{eq}) und dem maßgebenden hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze
- Entwicklung des hydraulischen Gradienten in Abhängigkeit der geotechnischen Eigenschaften des Filter- und Basismaterials (Durchlässigkeitsbeiwert, Porosität, Sättigungsgrad) und geometrischen Eigenschaften (Schichtdicke des Basis- und Filtermaterials)

4.6.1 Testprogramm für die numerische Sensitivitätsanalyse

Die Anwendung des numerischen Modells erfordert die Kenntnis über die Qualität der Ergebnisse sowie der Sensitivität des Modells in Abhängigkeit der Modellparameter. Das validierte Modell wird mit dem kalibrierten Ausgangszustand (siehe Abschnitt 4.4) verwendet, um den Einfluss folgender Parameter des Basis- und Filtermaterials zu untersuchen (siehe Tabelle 4.5):

- Sättigungsgrad (S_F , S_B)
- Forchheimer-Koeffizient (a_F ; a_B) bzw. Durchlässigkeitsbeiwert ($k_{f,F}$; $k_{f,B}$)
- Zusammenhang zwischen Porosität (n_F ; n_B) und dem Durchlässigkeitsbeiwert ($k_{f,F}$; $k_{f,B}$)

Tab. 4.5: Testprogramm für die numerische Sensitivitätsanalyse

Basisschicht			Filterschicht		
Sättigungs- grad S_B	Durchlässigkeits- beiwert $k_{f,B}$	Schichtdicke SD_B	Sättigungs- grad S_F	Durchlässigkeits- beiwert $k_{f,F}$	Schichtdicke SD_F
%	m/s	m	%	m/s	m
70,0	$6,84 \cdot 10^{-4}$	0,40	70,0	$1,59 \cdot 10^{-2}$	0,40
75,0	$6,84 \cdot 10^{-4}$	0,40	75,0	$1,59 \cdot 10^{-2}$	0,40
80,0	$6,84 \cdot 10^{-4}$	0,40	80,0	$1,59 \cdot 10^{-2}$	0,40
85,0	$6,84 \cdot 10^{-4}$	0,40	85,0	$1,59 \cdot 10^{-2}$	0,40
90,0	$6,84 \cdot 10^{-4}$	0,40	90,0	$1,59 \cdot 10^{-2}$	0,40
95,0	$6,84 \cdot 10^{-4}$	0,40	95,0	$1,59 \cdot 10^{-2}$	0,40
99,5	$6,84 \cdot 10^{-4}$	0,40	99,5	$1,59 \cdot 10^{-2}$	0,40
100,0	$6,84 \cdot 10^{-4}$	0,40	100,0	$1,59 \cdot 10^{-2}$	0,40
99,5	$2,00 \cdot 10^{-4}$	0,40	99,5	$1,59 \cdot 10^{-2}$	0,40
99,5	$4,00 \cdot 10^{-4}$	0,40	99,5	$1,59 \cdot 10^{-2}$	0,40
99,5	$6,00 \cdot 10^{-4}$	0,40	99,5	$1,59 \cdot 10^{-2}$	0,40
99,5	$8,00 \cdot 10^{-4}$	0,40	99,5	$1,59 \cdot 10^{-2}$	0,40
99,5	$6,84 \cdot 10^{-4}$	0,40	99,5	$1,00 \cdot 10^{-1}$	0,40
99,5	$6,84 \cdot 10^{-4}$	0,40	99,5	$5,00 \cdot 10^{-2}$	0,40
99,5	$6,84 \cdot 10^{-4}$	0,40	99,5	$1,00 \cdot 10^{-2}$	0,40
99,5	$6,84 \cdot 10^{-4}$	0,40	99,5	$5,00 \cdot 10^{-3}$	0,40
99,5	$6,84 \cdot 10^{-4}$	0,40	99,5	$1,00 \cdot 10^{-3}$	0,40
99,5	$6,84 \cdot 10^{-4}$	0,40	99,5	$5,00 \cdot 10^{-4}$	0,40
99,5	$6,84 \cdot 10^{-4}$	0,40	99,5	$1,00 \cdot 10^{-4}$	0,40

Die Sensitivität des maximalen hydraulischen Gradienten im Basismaterial unterhalb der Schichtgrenze $i_{\max(6,5)}$ (Abbildung 3.11) und der maximalen Filtergeschwindigkeit $v_{f,\max}$ werden anhand der folgenden geotechnischen Parameter analysiert, diskutiert und bewertet:

- Einfluss des Sättigungsgrads auf den hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$
- Einfluss der Porosität auf die Durchlässigkeit
- Einfluss der Durchlässigkeitsbeiwerte auf den hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$
- Einfluss der Dicke der Basisschicht auf den hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$
- Einflüsse der Anlagensteuerung

a) Einfluss des Sättigungsgrads im Basis- und Filtermaterial auf den hydraulischen Gradienten

Der Sättigungsgrad im Basis- und Filtermaterials wird im maßgebenden Bereich (siehe Abschnitt 2.2.2) von 95 % bis 100 % untersucht. Bei einem Anstieg des Sättigungsgrads im maßgebenden Bereich für Kornfilter in Sohlsicherungen von 95 % auf 100 % nimmt der hydraulische Gradient $i_{\max(6,5)}$ um 5 % ab (Abbildung 4.10).

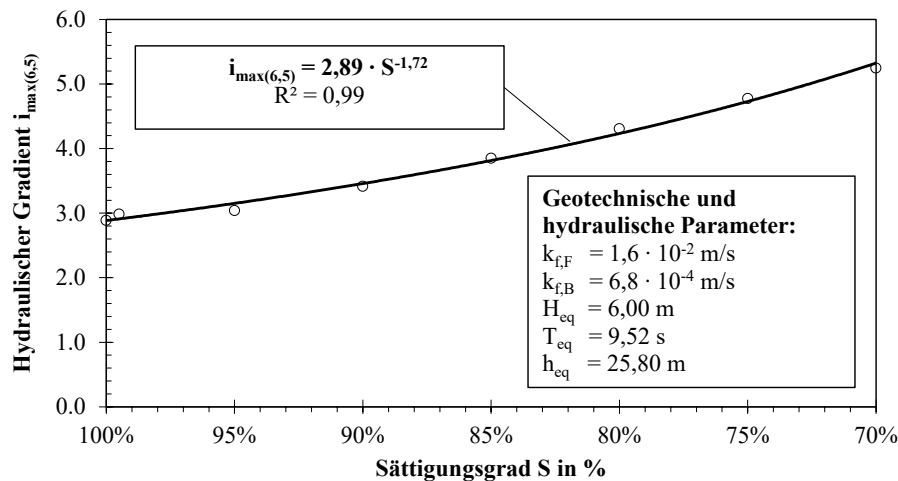


Abb. 4.10: Einfluss des Sättigungsgrads S auf den hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$

Untersuchungen, unter anderem nach Montenegro et al. (2015) und Wayllace et al. (2015), haben den wichtigen Einfluss des Gasanteils in Laborexperimenten zur Durchströmung gezeigt. Der Gasanteil in Laborversuchen kann nicht exakt erfasst werden, jedoch lässt sich umgekehrt durch die Anpassung des numerischen Modells auf einen hohen Sättigungsgrad von 99,5 % schließen (siehe Abschnitt 4.5). In den weiteren Untersuchungen wird daher der ermittelte Gasanteil von 0,5 % verwendet.

b) Einfluss der Porosität im Basis- und Filtermaterial auf die Durchlässigkeit

Die Porosität des Basis- und Filtermaterials kann während der Durchführung eines Laborexperiments nicht exakt bestimmt werden und die Beprobung nach einem Versuch unterliegt großen Unsicherheiten durch die gestörte Probe. Daher ist die Sensitivität der Ergebnisse durch Variation der Porosität n wichtig für die Bewertung der hydraulischen Modellversuche. Die numerische Modellierung der Durchlässigkeit in Abhängigkeit der Porosität kann durch die in Abschnitt 2.2.3 beschriebenen theoretischen Ansätze erfolgen. Bei einer Abnahme der Porosität n um 10 % (von $n = 0,40$ auf $0,36$) nimmt der Durchlässigkeitsbeiwert k_f um 36 % ab. Dieser Zusammenhang ist am Beispiel der Filterkonfiguration F1A2 in Abbildung 4.11 dargestellt. Damit besteht ein großer Einfluss der Porosität auf die Durchlässigkeit des Basis- und Filtermaterials. Dieser Einfluss wird daher als Änderung des Durchlässigkeitsbeiwertes k_f in der weiteren Sensitivitäts- und Parameterstudie berücksichtigt.

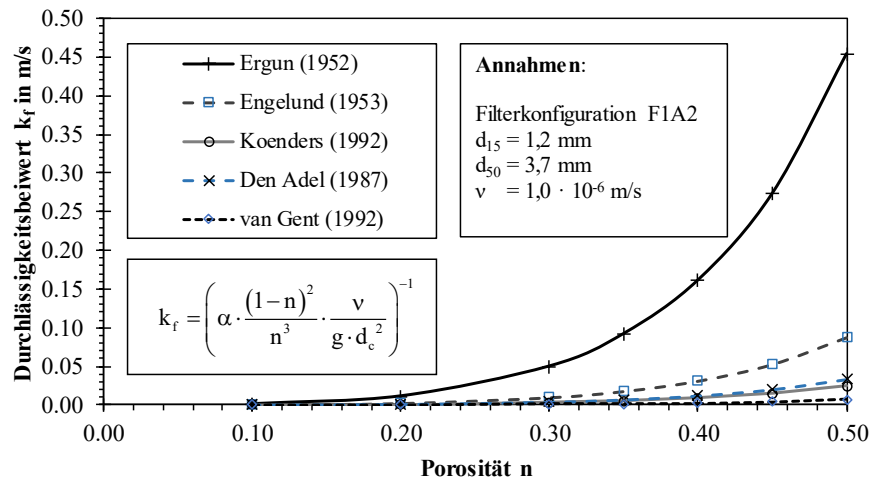


Abb. 4.11: Einfluss der Porosität auf den Durchlässigkeitsbeiwert k_f (am Beispiel der Filterkonfiguration F1A2)

c) Einfluss der Durchlässigkeitsbeiwerte auf den hydraulischen Gradienten

Die Anwendung des numerischen Modells auf die Porenwasserströmung in porösen Medien erfordert die Kenntnis der Forchheimer-Koeffizienten beziehungsweise der Durchlässigkeitsbeiwerte. Die theoretischen Ansätze zur Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes anhand der geometrischen Eigenschaften des Bodens (beschrieben in Abschnitt 2.2.3) führen zu Unsicherheiten, die wiederum im linearen Modell in gleicher Größenordnung zu Unsicherheiten bei der Ermittlung des maßgebenden hydraulischen Gradienten und der Filtergeschwindigkeit führen. Eine Abweichung des Durchlässigkeitsbeiwertes im Basismaterial um 50 % (von $k_{f,B} = 5,0 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ auf $7,5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$) führt zu einem Fehler von 1,3 % des maximalen hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze $i_{\max(6,5)}$. Der Zusammenhang zwischen dem Durchlässigkeitsbeiwert des Basismaterials $k_{f,B}$ und dem maximalen hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze $i_{\max(6,5)}$ ist in Abbildung 4.12 dargestellt.

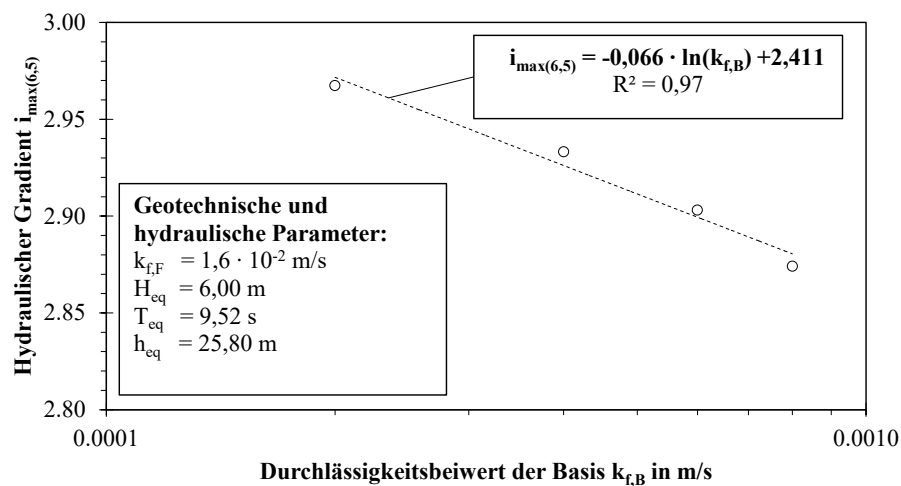


Abb. 4.12: Einfluss des Durchlässigkeitsbeiwerts des Basismaterials $k_{f,B}$ auf den maximalen hydraulischen Gradienten im Basismaterial $i_{\max(6,5)}$ bei gegebener Durchlässigkeit des Filtermaterials ($k_{f,F} = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$)

Bei gleicher Durchlässigkeit des Basismaterials ($k_{f,B} = 6,8 \cdot 10^{-4}$ m/s) führt ein Anstieg der Durchlässigkeit des Filtermaterials $k_{f,F}$ um 100 % (von $k_{f,F} = 5,0 \cdot 10^{-3}$ auf $10,0 \cdot 10^{-3}$ m/s) zu einem Anstieg des hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ um 30 %.

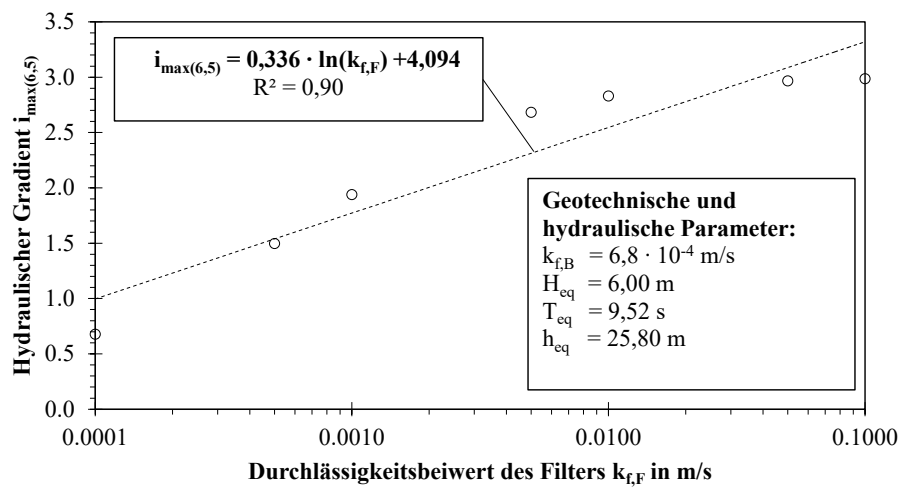


Abb. 4.13: Einfluss des Durchlässigkeitsbeiwerts des Filtermaterials $k_{f,F}$ auf den hydraulischen Gradienten im Basismaterial $i_{\max(6,5)}$ bei gegebener Durchlässigkeit des Basismaterials ($k_{f,B} = 6,8 \cdot 10^{-4}$ m/s)

Die Sensitivität des maßgebenden hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze $i_{6,5}$ durch Variation der Durchlässigkeitsbeiwerte des Basis- und Filtermaterials zeigt zusammen mit den Unsicherheiten in der Ermittlung dieser Parameter die große Bedeutung für die numerische Modellierung. Dazu ist die Bandbreite der in den Laborexperimenten ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte des Basis- und Filtermaterials zusammen mit der erwarteten Abweichung des hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ vom Mittelwert in Tabelle 4.6 dargestellt.

Tab. 4.6: Maximale Abweichung des hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ vom Mittelwert in Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwerts k_f

Durchlässigkeitsbeiwerte des Basis-/Filtermaterials								
		Basis	F1A2	F1A3	F1B1	F1C1	F2A1	F2A2
Bereich des Durchlässigkeitsbeiwerts k_f im Laborexperiment	10^{-4} m/s	5,9-7,8	63-276	110-169	59-144	29-44	67-155	61-119
Maximale Abweichung des hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ im numerischen Modell	%	0,4	12,2	3,0	7,1	3,5	6,5	5,1

Der hydraulische Gradient an der Schichtgrenze $i_{\max(6,5)}$ ist die maßgebende Größe in Bezug auf den Bewegungsbeginn durch Kontakterosion. Die Sensitivität des hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ durch die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte werden anhand der Abweichungen (Tabelle 4.6) bewertet. Die großen Bandbreiten des Durchlässigkeitsbeiwertes der Filterkonfigurationen F1A2 führen zu einer Abweichung von 12,2 % und stellen damit die Versuchsreihe mit den größten Unsicherheiten dar. Diese Abweichung konnte durch die Optimierung der Mess- und Regeltechnik der Versuchsanlage für die weiteren Versuchsreihen (F1A3, F1B1, F1C1, F2A1, F2A2) auf maximal 7,1 % (F1B1) deutlich reduziert werden. In den meisten Fällen kann ein deutlich geringerer Einfluss durch geringere Veränderungen des hydraulischen und geohydraulischen Verhaltens der Filterprobe festgestellt werden.

Die Sensitivität der Durchlässigkeit des Basis- und Filtermaterials wird anhand des maximalen hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ gemessen. Aufgrund der Linearisierung der Filtergeschwindigkeit in Abhängigkeit des hydraulischen Gradienten können hydraulische Prozesse, wie der Fließwiderstand unter turbulenter Porenwasserströmung und Trägheitseffekte der instationären Strömung nicht abgebildet werden. Der zusätzliche Fließwiderstand wird damit durch den Forchheimer-Koeffizienten a mit $a = 1/k_f$ linearisiert. Die Verwendung des linearisierten Modells führt bei steigender Turbulenz zu einer Überschätzung der Durchlässigkeit des Filtermaterials und damit zu einer Überschätzung des hydraulischen Gradienten. In Bezug auf die Herleitung von Ansätzen zur hydraulischen Bemessung von Kornfiltern liegt dieser Ansatz damit auf der sicheren Seite.

d) Einfluss der Dicke der Basisschicht SD_B auf den hydraulischen Gradienten (Modelleffekt)

Die hydraulische Stabilität von Kornfiltern ist abhängig von der Dämpfung des dynamischen Drucks im Basismaterial. Im Laborexperiment ist die Dicke der Basisschicht auf $SD_B = 0,40$ m begrenzt, wodurch die untere Randbedingung den hydraulischen Gradienten beeinflusst. Dieser Einfluss kann im numerischen Modell durch die Berücksichtigung größerer Schichtdicken als im Labor untersucht werden. Die Dämpfung des dynamischen Porenwasserdrucks erfolgt im numerischen Modell innerhalb der Basisschicht und ist damit im Vergleich zum Laborexperiment unbeeinflusst durch die untere Randbedingung. Die Untersuchung der Schichtdicke des Basismaterials wird daher in Abschnitt 6.1.3 (Abbildung 6.8) näher betrachtet.

e) Einflüsse der Anlagensteuerung auf die Porenwasserdruckverteilung (Modelleffekt)

Im Vergleich der hydraulischen Prozesse im Laborexperiment und der numerischen Simulation ergeben sich Unterschiede zu der Phasenverschiebung zwischen Filtergeschwindigkeit und dem hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ sowie in der Dämpfung des Porenwasserdrucks im Basismaterial. Beide Effekte können im numerischen Modell mit einer ausreichend hohen Basisschicht und einer konstanten Druckrandbedingung am unteren Rand ausgeschlossen werden. Die Einflüsse der Anlagensteuerung auf die Porenwasserdruckverteilung wird daher in Abschnitt 6.1.3 näher betrachtet.

In Hinblick auf die Entwicklung des hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze $i_{6,5}$ ergibt sich durch die Sensitivität der Durchlässigkeitsbeiwerte im Basis- und Filtermaterial in Abhängigkeit der Porosität eine besondere Bedeutung für das Versuchsprogramm der Parameterstudie. Eine weitere wichtige Erkenntnis aus der Sensitivitätsanalyse ist der Zusammenhang zwischen dem Abstand der unteren Randbedingung zur Schichtgrenze. Aus diesem Grund wird vor der Durchführung der Parameterstudie die Ermittlung des erforderlichen Abstands SD_B erforderlich. Die Schichtdicke des Filters wird in der Parameterstudie detailliert untersucht.

4.6.2 Testprogramm der numerischen Parameterstudie

Die Beschreibung der hydraulischen Filterstabilität unter Wellenbelastung erfordert die Kenntnis der hydraulischen Prozesse. Zur Untersuchung der maßgebenden hydraulischen Prozesse im Filteraufbau wird hierzu eine Parameterstudie mit dem kalibrierten und validierten Modell *geotechFoam* in Kapitel 7 durchgeführt (Abschnitt 7.1.1).

Hydraulische Randbedingungen: Die hydraulischen Randbedingungen werden ohne Skalierung aus den Wellenparametern (Wellenhöhe H und Wellenperiode T in der Wassertiefe h) entsprechend der Methodik in Abschnitt 3.2.1 ermittelt. In der numerischen Simulation werden die Wellenparameter als

äquivalente Parameter zu einer freien Wasseroberfläche verwendet. Das Versuchsprogramm der numerischen Simulationen in Tabelle 4.7 beinhaltet die Hauptversuche der Laborexperimente bei einer äquivalenten Wassertiefe von $h_{eq} = 25$ m (siehe Abschnitt 3.2). Das Versuchsprogramm wird durch höhere Wellensteilheiten ergänzt, welche im Laborexperiment nicht vollständig erreicht werden konnten. Weiterhin wird das Versuchsprogramm durch zusätzliche Versuche mit äquivalenten Wellenperioden im Bereich von $T_{eq} = 7,25$ s bis 14,00 s, mit äquivalenten Wellenhöhen von $H_{eq} = 7,50$ m bis 35,10 m und äquivalenten Wassertiefen von $h_{eq} = 15,00$ m bis 45,00 m verdichtet.

Tab. 4.7: Hydraulische Parameter (als äquivalente Wellenparameter H_{eq} und T_{eq} mit h_{eq}) des Testprogramms der numerischen Parameterstudie

Wassertiefe h_{eq} in m			15,0			25,0			45,0		
Wellenhöhe H_{eq} in m			7,50	10,00	11,70	8,60	11,70	19,50	11,50	22,20	35,10
Wellenperiode T_{eq} in s	7,25	Wellensteilheit H/L	0,106	0,141	-	0,110	-	-	0,141	-	-
	9,52		0,072	0,096	0,113	0,071	0,096	-	0,085	-	-
	11,00		0,060	0,081	0,094	0,058	0,078	0,131	0,067	0,128	-
	12,50		0,052	0,069	0,081	0,049	0,066	0,110	0,054	0,105	-
	14,00		0,046	0,061	0,071	0,042	0,058	0,096	0,046	0,089	0,141

Wellenparameter: Die Wellenparameter der numerischen Parameterstudie sind zusammen mit den Wellenparametern der hydraulischen Laborexperimente den Anwendungsbereichen der Wellentheorien in Abbildung 4.14 zugeordnet.

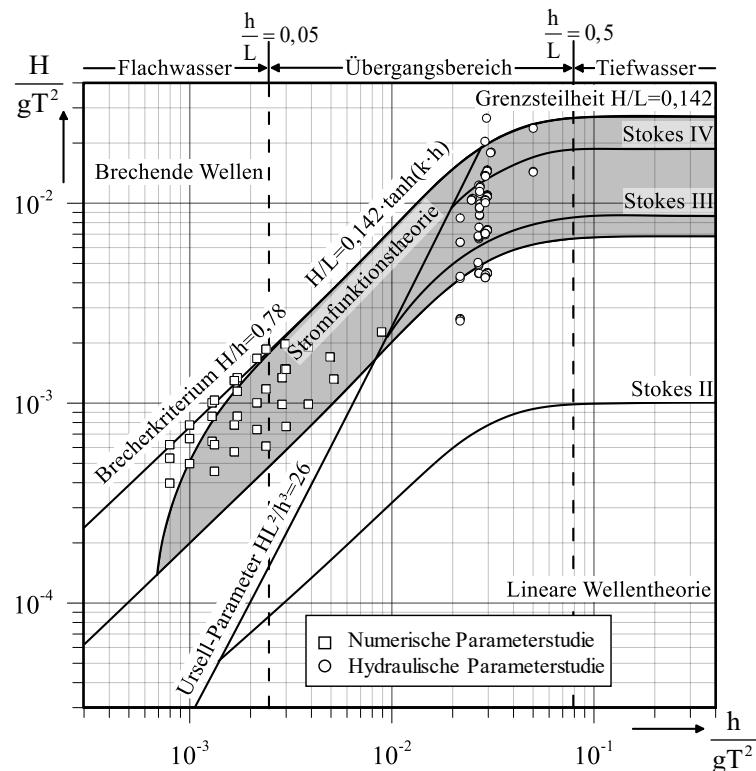


Abb. 4.14: Einordnung der numerische Untersuchungen in die Anwendungsbereiche der Wellentheorien (modifiziert nach SPM, 1984)

Die Wellenparameter der numerischen Parameterstudie ergänzen die hydraulischen Laboruntersuchungen im Flachwasser- und Übergangsbereich und decken damit einen relativ großen Bereich der Wellensteilheit ($H/L = 0,04$ bis $0,14$) des Brecherindex ($H/h = 0,26$ bis $0,78$) und der relativen Wassertiefe ($h/L = 0,09$ bis $0,50$) im Übergangsbereich zwischen Flach- und Tiefwasser ab.

Geotechnische Parameter: Neben den hydraulischen Parametern werden folgende geotechnische Parameter untersucht:

- Abstand zwischen einer undurchlässigen Schicht und der Schichtgrenze SD_B (Schichtdicke der Basisschicht)
- Schichtdicke der Filterschicht SD_F
- Durchlässigkeitsbeiwerte des Filtermaterials $k_{f,F}$ in Abhängigkeit der Porosität n_F

Das Versuchsprogramm in Tabelle 4.7 wird mit den Durchlässigkeitsbeiwerten des Filtermaterials von $k_{f,F} = 5,0 \cdot 10^{-3}$ m/s; $1,0 \cdot 10^{-2}$ m/s und $2,0 \cdot 10^{-2}$ m/s durchgeführt. Dies entspricht der geringsten, mittleren und höchsten Durchlässigkeit der untersuchten Filtermaterialien (siehe Tabelle 4.2 in Abschnitt 4.4). In der Parameterstudie wird der mittlere Durchlässigkeitsbeiwert des Basismaterial aus den Laborexperimenten $k_{f,B} = 6,8 \cdot 10^{-4}$ m/s verwendet (siehe Tabelle 4.2). Die Schichtdicke des Filters wird mit den in der Baupraxis üblichen Stufen $SD_F = 0,30$ m; $0,40$ m und $0,50$ m untersucht. Der Abstand zwischen undurchlässiger Schicht und der Schichtgrenze zwischen Basis und Filter wird mit $SD_B = 0,40$ m; $0,50$ m; $1,00$ m; $2,00$ m und $3,00$ m untersucht.

Das Versuchsprogramm ermöglicht den direkten Vergleich zwischen der numerischen Simulation und den Laborexperimenten mit der Wechseldurchströmungsanlage. Weiterhin wird die Ermittlung der Porenwasserdruckverteilung und des hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze ohne den Einfluss der Anlagensteuerung und des Materialtransports in der Probe ermöglicht.

Versuchsdurchführung und Datenerfassung: Die Erfassung der Porenwasserdrücke erfolgt auf der z-Achse mit einem Abstand von 1 cm, um einen Vergleich mit der Druckmessung der Laborexperimente mit einem Abstand von 10 cm herzustellen. Die Anordnung der Drucksensoren bzw. der Positionen der Datenausgabe ist in Abbildung 3.11 in Abschnitt 3.1.2 dargestellt. Die Zeitreihen des Porenwasserdrucks und der Filtergeschwindigkeit werden mit einer Frequenz von 10 Hz ausgegeben, um den oszillierenden Verlauf im Vergleich mit den Laborexperimenten gut abbilden zu können.

Durch die numerische Parameterstudie können die Laborexperimente in Bezug auf die hydraulischen Parameter erweitert werden. Eine Erweiterung des Versuchsprogramms erfolgt durch einen größeren Bereich der Wellenhöhe ($H = 7,5$ m bis $35,1$ m), der Wellenperiode ($T = 6,0$ s bis $14,0$ s) und der Wassertiefe ($h = 15$ m, 25 m und 45 m). Hieraus ergeben sich eine Wellensteilheit $H/L = 0,04$ bis $0,14$, ein Brecherindex $H/h = 0,26$ bis $0,78$ und eine relative Wassertiefe $h/L = 0,09$ bis $0,50$ im Übergangsbereich zwischen Flach- und Tiefwasser. Mit den Ergebnissen der umfangreichen Simulationen kann der Zusammenhang zwischen Wellenparametern und dem maßgebenden hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filterschicht ermittelt werden. Dies bildet die Grundlage für die hydraulische Bemessung von Kornfiltern unter der Einwirkung welleninduzierter (oszillierender) Porenwasserströmungen.

4.7 Anwendbarkeit und Einschränkungen

Die Einschränkungen des verwendeten numerischen Modells können in folgende Hauptgruppen eingeteilt werden:

- Annahmen und Vereinfachungen der Eingangs- und Randbedingungen
- Geohydraulisches Modell *geotechFoam* zur Simulation von Strömungen in porösen Medien
- Gittergeometrie und -auflösung

4.7.1 Eingangs- und Randbedingungen

In dieser Studie werden die hydraulischen Randbedingungen des Modells nach linearer Wellentheorie ermittelt. Eine Erweiterung mit Wellentheorien höherer Ordnung kann ebenfalls implementiert werden. Für den Vergleich zwischen den Laborexperimenten mit der Wechseldurchströmungsanlage und den Ergebnissen der numerischen Modellierung zeigt sich ein sehr guter Zusammenhang, da in beiden Fällen die Druckrandbedingungen nach linearer Wellentheorie ermittelt werden (siehe Abschnitt 3.3.1).

Eine exakte Ermittlung der geotechnischen und geometrischen Eigenschaften der Probe im Laborexperiment kann nicht erreicht werden. Aus diesem Grund werden mittlere Werte der Probenparameter für die numerische Modellierung gewählt. Für Materialien mit weitaus höherer oder geringerer Durchlässigkeit im Vergleich zu dem untersuchten Basis- und Filtermaterial bedarf es einer Erweiterung des Modells um den turbulenten und instationären Fließwiderstand der erweiterten Forchheimer-Gleichung (Gleichung 2.28) sowie einer erneuten Kalibrierung und Validierung des Modells.

4.7.2 Simulation von Strömungen in porösen Medien mit dem Modell *geotechFoam*

Die Simulation der nichtlinearen Strömungsprozesse kann durch die lineare Darcy-Gleichung abgebildet werden. Die durchgeführten Untersuchungen beziehen sich auf eine relativ geringe äquivalente Durchlässigkeit der Gesamtprobe von $k_{f,eq} = O(10^{-3})$ m/s, die durch das Basismaterial (Sand) mit einem Durchlässigkeitsbeiwert in der Größenordnung von $k_{f,B} = O(10^{-4})$ m/s bestimmt wird. Da die Filtergeschwindigkeit im Filtermaterial durch die geringere Durchlässigkeit des Basismaterials bestimmt wird, befindet sich der Strömungszustand im Filter damit im Übergangsbereich zwischen dem Darcy- und Forchheimer-Regime mit $Re^* < 20$ (Abschnitt 2.1.5 und 2.2.3). In diesem Übergangsbereich ist der Anteil des Trägheitsterms (lokale und konvektive Beschleunigung) der Forchheimer-Gleichung am hydraulischen Widerstand gegenüber dem laminaren und turbulenten Term verhältnismäßig gering (Abschnitt 2.2.3). Der turbulente Anteil des hydraulischen Widerstands wird durch die Linearisierung zusammen mit dem laminaren Anteil berücksichtigt. In Hinblick auf die Porenwasserdruckverteilung und die hydraulischen Gradienten führt das verwendete linearisierte Modell in der Validierung zu einer hinreichenden Genauigkeit mit einem relativen Fehler des hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ von 3,3 % bis 18,2 % (Abschnitt 4.5.3). In Bezug auf die Fragestellung der hydraulischen Filterstabilität in Abhängigkeit der äquivalenten Wellenparameter (H_{eq} , T_{eq} , h_{eq}) können somit wichtige Ergebnisse durch das numerische Modell erzielt werden.

4.7.3 Gittergeometrie und -auflösung

Das Gitter des numerischen Modells wurde anhand der Geometrie der Versuchszelle in der Wechseldurchströmungsanlage erstellt. Dies ist für den direkten Vergleich zwischen Laborergebnissen und den Ergebnissen des numerischen Modells erforderlich. Die Wände werden als undurchlässig betrachtet es

entstehen jedoch im numerischen Modell wie auch im Labormodell Wandeﬀekte. Bei einem ausreichend großen Durchmesser nimmt dieser Einfluss jedoch zur Zellmitte ab. Aus diesem Grund werden die Verläufe des Drucks und der Filtergeschwindigkeit in der Zellmitte abgegriffen. In diesem Zusammenhang kann ebenfalls ein Einfluss der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filterschicht festgestellt werden. Aus gleichem Grund wird die Position der Datenerfassung um 1 cm (dies entspricht 1,25 % der Probenhöhe) von der Schichtgrenze verlagert und in der Berechnung der hydraulischen Gradienten berücksichtigt.

Ebenfalls bedarf es einer Anpassung an der Schichtgrenze durch die Wahl mehrerer Übergangsschichten mit einer gestaffelten Durchlässigkeit, um eine Unstetigkeit zwischen zwei Schichten stark unterschiedlicher Durchlässigkeit zu vermeiden. Die Gitterauflösung beträgt 1 cm und ist im Bereich der Schichtgrenze ober und unterhalb auf 0,1 cm verdichtet. Die Durchlässigkeit der einzelnen Übergangsschichten ergibt sich als äquivalenter Durchlässigkeitsbeiwert aus den Durchlässigkeiten der angrenzenden Schichten. Hierdurch wird die Unstetigkeit der Strömung an den angrenzenden Schichten unterschiedlicher Durchlässigkeit mit je 10 Übergangsschichten durch die feinere Auflösung vermieden (siehe Abschnitt 4.3.1). Durch die Kalibrierung des Modells wurde auch festgestellt, dass die Auflösung von 1 cm außerhalb der Schichtgrenze ausreicht, da bei feinerer Auflösung keine wesentliche Verbesserung der Porenwasserdruckverteilung erreicht wird.

Die Anwendbarkeit des numerischen Modells unterliegt einigen Einschränkungen, die bei der Übertragung auf andere Anwendungen zu beachten sind. Es entstehen Maßstabeffekte bei der Anwendung des Modells auf wesentlich feinere oder gröbere Materialien, durch den Übergang des laminaren Strömungsregimes in ein turbulentes Strömungsregime (mit $Re^* \gg 1$). Hierdurch wird im Modell der Fließwiderstand bei einem gegebenen hydraulischen Gradienten unterschätzt und die Filtergeschwindigkeit überschätzt. Die Eignung des Modells *geotechFoam* zeigt sich durch die Validierung des kalibrierten Modells mit den untersuchten Materialien dieser Studie. Die Sensitivitätsanalyse der wichtigsten geotechnischen und geohydraulischen Parameter ermöglicht die Bewertung der Ergebnisse sowie die Spezifizierung möglicher Fehlerquellen und Grenzen der Anwendbarkeit.

4.8 Zusammenfassung und Bewertung der numerischen Untersuchungen

In diesem Kapitel ist eine Zusammenfassung der wichtigsten Gleichungen und des Aufbaus des numerischen Modells *geotechFoam* nach El Safti (2015) basierend auf dem OpenFOAM®-System dargestellt. Das numerische Modell *geotechFoam* ist aufgrund der Erkenntnisse aus der Wissensstandsanalyse (Kapitel 2) und der hydraulischen Laborexperimente (Kapitel 3) im Sinne der Zielsetzung dieser Studie optimiert worden. Durch die Implementierung der Randbedingungen basierend auf Wellenparametern sowie durch die Generierung und Optimierung des Gitters, können die hydraulischen Prozesse in der Versuchszelle der Wechseldurchströmungsanlage mit dem geotechnischen Modell abgebildet werden. Die Gleichungslösung wird in dieser Studie aufgrund der Unstetigkeit zwischen zwei Schichten unterschiedlicher Durchlässigkeit unter anderem durch die Einführung dünner Übergangsschichten für eine schrittweise Änderung der Durchlässigkeit optimiert.

Die Ergebnisse der hydraulischen Laborexperimente dienen zur Validierung des Modells und die Daten der geotechnischen Laboruntersuchungen ermöglichen eine Kalibrierung anhand der Durchlässigkeitsbeiwerte des Basis- und Filtermaterials. Die Validierung zeigt die korrekte Simulation der hydraulischen Prozesse im Filter- und Basismaterial mit sehr guter Übereinstimmung, sodass eine zuverlässige Ermittlung der hydraulischen Gradienten in Abhängigkeit der äquivalenten Wellenparameter ermöglicht wird. Mit dem numerischen Modell können Parameterstudien durchgeführt werden, um die Interaktion zwischen Wellen und geohydraulischen Prozessen beschreiben zu können.

Eine Anwendung des Modells erfordert die genaue Kenntnis der geotechnischen Parameter, wie Durchlässigkeit, Forchheimer-Koeffizienten und Porosität. Hierzu sind grundsätzlich hydraulische Laborexperimente mit einer geeigneten Versuchseinrichtung, wie der Wechseldurchströmungsanlage, erforderlich.

Mit Hilfe des numerischen Modells können folgende Vorteile als Vergleich und Ergänzung zu den hydraulischen Laborexperimenten zu folgenden Punkten erreicht werden:

- Detaillierte hochaufgelöste Abbildung der Porenwasserdruckverteilung
- Untersuchung der Druckdämpfung im Basismaterial durch Erweiterung der Probengeometrie
- Erweiterung des Versuchsprogramms durch Steigerung der hydraulischen Belastungen ohne den Einfluss der Materialbewegung und ohne Einflüsse der Anlagenregelung
- Durchführung von Sensitivitätsstudien (z. B. zur Durchlässigkeit, Porosität und Sättigungsgrad)
- Zeit- und Kostenersparnis in der Durchführung von Parameterstudien zu hydraulischen und geotechnischen Parametern

Durch das validierte numerische Modell wird ermöglicht, Sensitivitätsanalysen und Parameterstudien zu den geohydraulischen Eigenschaften, wie Porosität, Sättigungsgrad und Permeabilität in erweitertem Umfang zu den vorhandenen hydraulischen Laborexperimenten durchzuführen. Weiterhin ist es möglich die hydraulischen Bedingungen oberhalb der Systemgrenzen der hydraulischen Versuchsanlage (ohne störende Einflüsse des Materialtransports) zu untersuchen.

In Kapitel 5 werden die geohydraulischen Prozesse im Filteraufbau durch die Analyse der Laborexperimente vorgestellt und diskutiert. Anschließend werden auf dieser Grundlage die hydraulischen Prozesse mit der Unterstützung der numerischen Simulation in Kapitel 6 dargestellt und bewertet. Die zusammenfassende Bewertung der Filterstabilität im Zusammenhang mit den Wellenparametern wird hierdurch in Kapitel 7 ermöglicht. Damit liefert die numerische Simulation einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung hydraulischer Bemessungsansätze für Kornfilter unter Wellenbelastung.

5 Laborergebnisse: Erosions- und bodenmechanische Prozesse

Zur Beschreibung der (geo-) hydraulischen Prozesse im Filteraufbau ist die Kenntnis der geotechnischen und geohydraulischen Prozesse erforderlich. Es werden daher in diesem Kapitel die Eigenschaften der untersuchten Filtermaterialien und die damit einhergehenden Prozesse im Filter beschrieben. Die Analyse der Kornverteilung und des Verformungsverhaltens in diesem Kapitel wird mit der Analyse des hydraulischen Verhaltens in Kapitel 6 zur Bewertung der Filterstabilität in Kapitel 7 zusammengeführt.

Die Auswertung der Laboruntersuchungen zu bodenmechanischen Prozessen und Erosionsprozessen mit der Wechseldurchströmungsanlage wird in diesem Kapitel zur Ermittlung des kritischen hydraulischen Gradienten zur hydraulischen Filterbemessung durchgeführt (Abbildung 5.1).

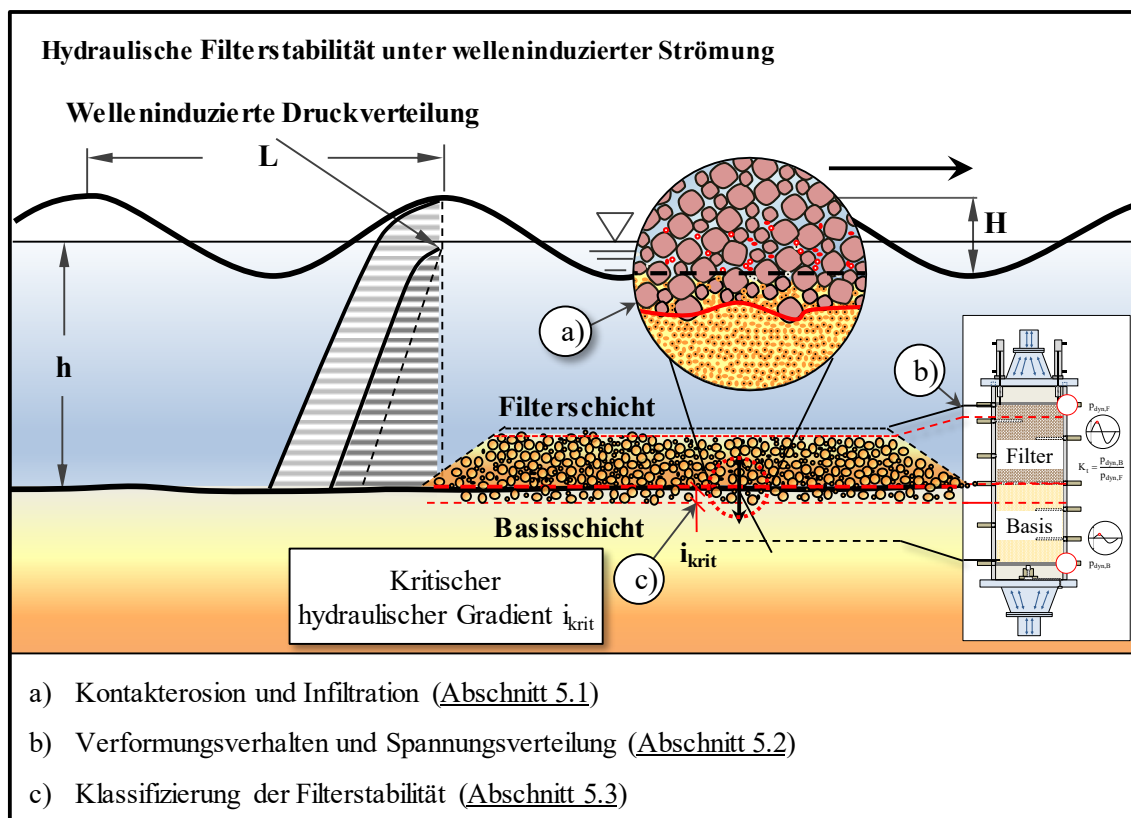


Abb. 5.1: Untersuchte Erosionsprozesse und bodenmechanische Prozesse im Labor

In Abschnitt 5.1 wird die Kontakterosion und Infiltration des Basismaterials sowie die innere Erosion im Porenraum des Filters durch Analysen der Kornverteilungen vor und nach der Versuchsdurchführung diskutiert und bewertet, um die maßgebenden Prozesse den Filtereigenschaften und der hydraulischen Einwirkung zuordnen zu können. Die Verformung der Filteroberkante sowie die Verteilung der Spannungen im Filteraufbau werden in Abschnitt 5.2 analysiert und zusammen mit den Erosionsprozessen für die Bewertung und Klassifizierung der Filterstabilität in Abschnitt 5.3 untersucht. Abschließend erfolgt die Zusammenfassung und Bewertung der geohydraulischen Prozesse zusammen mit der Diskussion der Modelleffekte und Einschränkungen in Abschnitt 5.4 (Abbildung 5.2).

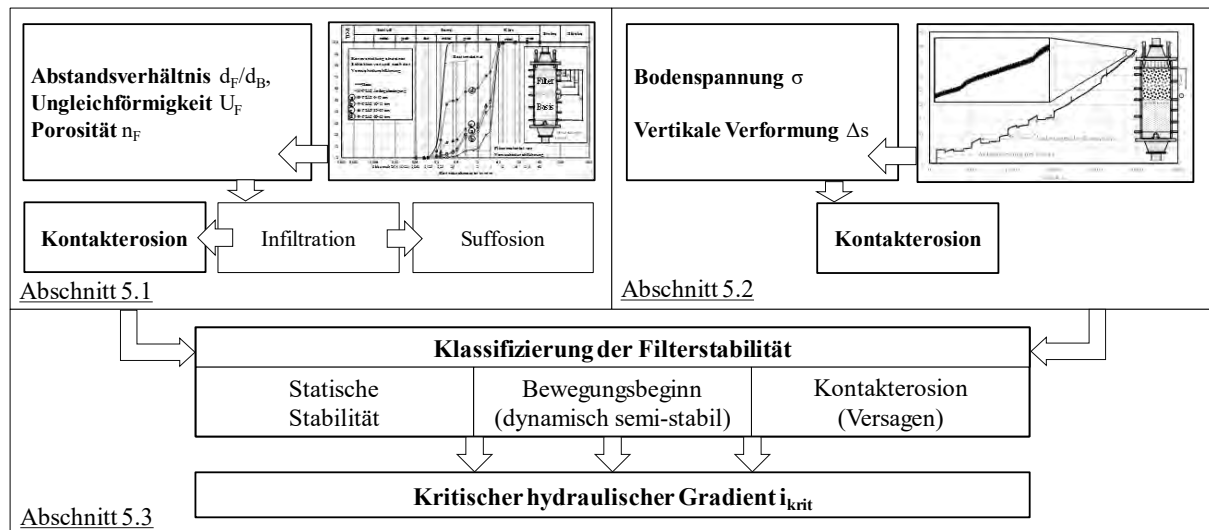


Abb. 5.2: Untersuchte Erosionsprozesse und bodenmechanische Prozesse in diesem Kapitel

5.1 Kontaktersion und Infiltration

In diesem Abschnitt werden die in den Laborexperimenten beobachteten geohydraulischen Prozesse analysiert. Hierbei erfolgt die Unterscheidung in Kontaktersion des Basismaterials an der Schichtgrenze zum Filter, Infiltration des Basismaterials im Porenraum des Filters und Suffosion des Basis-Filter-Gemisches (siehe Abschnitt 2.1.2).

Während der hydraulischen Modellversuche wird beobachtet, wie feineres Basismaterial durch Kontaktersion in den Filter eingetragen wird. Weiterhin wird die Verlagerung der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filterschicht durch das Einsinken des Filters in das Basismaterial festgestellt. Die visuell beobachteten Prozesse werden durch die Kornverteilungen einzelner Schichten des Basis- und Filtermaterials bestätigt.

Die untersuchten Filtermaterialien werden nach geometrischen Kriterien als potentiell filterstabil aus einzelnen Kornfraktionen hergestellt. Das Filtermaterial F1A wird in den Filterkonfigurationen F1A1, F1A2 und F1A3 wiederholend untersucht, um eine steigende hydraulische Wellenbelastung zu untersuchen und die Wiederholbarkeit zu prüfen. Das Filtermaterial F1A dient als Referenz für den Vergleich der (potentiellen) hydraulischen Stabilität unter welleninduzierter Strömung der folgenden Filtermaterialien:

- *geringere hydraulische Stabilität*: hohes Abstandsverhältnis bei gleicher Ungleichförmigkeit mit F1B1
- *höhere hydraulische Stabilität*: geringeres Abstandsverhältnis und geringere Ungleichförmigkeit mit F1C1
- *ähnliche hydraulische Stabilität*: höheres Abstandsverhältnis und geringere Ungleichförmigkeit mit F2A1 und F2A2

Aus diesen Anforderungen ergeben sich die Filterkonfigurationen F1B1, F1C1, F2A1 und F2A2 nach Tabelle 5.1 (siehe auch Abschnitt 3.2.2):

Tab. 5.1: Abstandsverhältnis und Ungleichförmigkeit des untersuchten Filtermaterials

Material			F1A1	F1A2	F1A3	F1B1	F1C1	F2A1	F2A2
Abstandsverhältnis	d_{15F}/d_{85B}	-	4,5	4,5	4,3	19,9	2,3	8,3	9,9
	d_{15F}/d_{50B}	-	4,8	4,8	4,6	21,3	2,4	8,9	10,5
	d_{15F}	mm	1,2	1,2	1,2	5,4	0,6	2,2	2,7
Ungleichförmigkeit	d_{60F}/d_{10F}	-	5,9	5,9	6,6	5,5	2,3	4,8	2,5

Die Stabilität kann somit anhand der kritischen hydraulischen Parameter und der erforderlichen geometrischen Eigenschaften des Filtermaterials bewertet werden. Die Kornverteilungen des untersuchten Filtermaterials werden anhand von Stichproben vor der Versuchsdurchführung erstellt (Abschnitt 3.2.2). Anschließend werden die einzelnen Schichten des Filtermaterials nach der Versuchsdurchführung ebenfalls beprobt und analysiert (Abschnitt 5.1.1). Dieses Vorgehen ermöglicht die Beschreibung der Erosionsprozesse an der Schichtgrenze und Infiltration des Basismaterials im Porenraum des Filters (Abschnitt 5.1.1) sowie die innere Erosion im Porenraum des Filters (Abschnitt 5.1.2).

5.1.1 Bewertung der Erosionsprozesse durch Siebanalysen

In Abbildung 5.3 sind die Kornverteilungen vor und nach der Versuchsdurchführung für das Filtermaterial F1A2 (Tabelle 5.1) dargestellt. Das gleiche Material wurde auch für die Vorversuche mit der Filterkonfiguration F1A1 verwendet. Hierbei werden die einzelnen Schichten (a – f) im Filter- und Basismaterial durch Siebungen analysiert und im Kornverteilungsdiagramm aufgetragen.

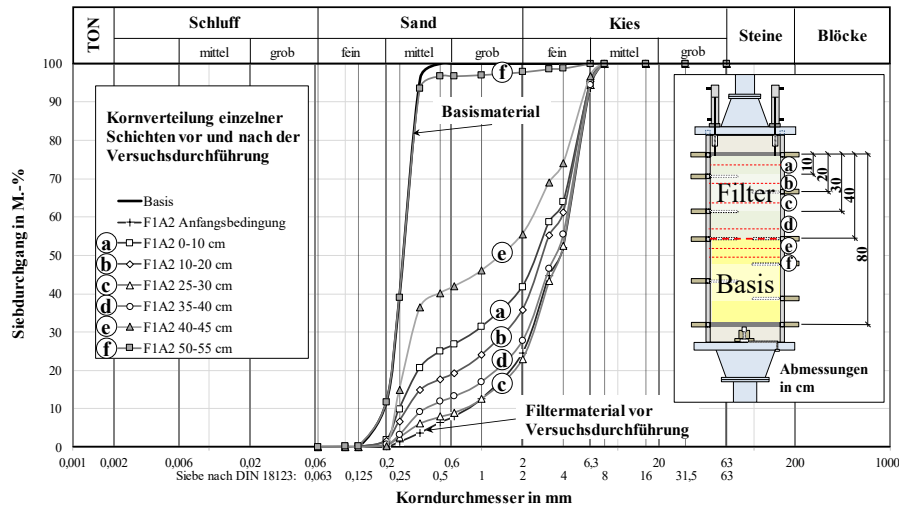


Abb. 5.3: Kornverteilung des Basis- und Filtermaterials (in den Schichten a - f) vor und nach der Durchführung der Modellversuche (Filterkonfiguration F1A2)

Der Transport des Basismaterials im Porenraum des Filters, hervorgerufen durch die Kontakterosion, kann als innere Erosion (Suffosion) des Basis-Filter-Gemisches beobachtet werden. In der Kornverteilung wird die Infiltration des Basismaterials an der Schichtgrenze durch die Zunahme des Feinanteils zwischen den Schichten c und d in Abbildung 5.3 sichtbar. Eine weitere Zunahme des Feinanteils, ausgehend von der Schichtgrenze (Schicht c) bis zum oberen Teil des Filters (Schicht a und b), entsteht durch die fortschreitende innere Erosion des Basismaterials im Porenraum des Filters und durch die anschließende Kolmation an der Oberkante des Filters. Bedingt durch den Modellaufbau wird dieser Prozess an der Oberkante des Filters gestoppt, da ein Austrag der feineren Kornfraktionen aus dem Filter heraus durch den aufliegenden geotextilen Filter verhindert wird. Dies lässt sich an der Kornverteilung im Bereich 0 - 20 cm unterhalb der Filteroberkante (Schichten a und b) erkennen. Im Filter an der Schichtgrenze bis 5 cm oberhalb (Schicht d) ist zu erkennen, dass der Feinanteil des Filters deutlich zunimmt. Der Korndurchmesser d_{10} betrug zuvor $d_{10} = 0,8$ mm und nach Durchführung der Versuchsreihe beträgt der Korndurchmesser $d_{10} = 0,4$ mm. Hierdurch reduziert sich die Durchlässigkeit im Bereich der Schichtgrenze im Filter. Weiterhin ist zu erkennen, dass der Grobanteil im Basismaterial unterhalb der Schichtgrenze zunimmt. Im Bereich von 5 cm unterhalb der Schichtgrenze liegt ein Gemisch aus Filtermaterial und Basismaterial vor. Im Fall der Filterkonfiguration F1A2 wurde Filtermaterial in bis zu 10 cm Tiefe unterhalb der Schichtgrenze aufgefunden (Schicht e und f). Infolge der Kontakterosion, Kolmation und Suffosion entstanden gemischte Schichten aus Basis- und Filtermaterial zwischen den Schichten c und f mit unterschiedlichen geotechnischen und geohydraulischen Eigenschaften, die für die weitere Analyse berücksichtigt werden.

In Abbildung 5.4 ist die Filterkonfiguration F1A3 (siehe Tabelle 5.1) mit den Kornverteilungen in unterschiedlichen Schichten des Aufbaus dargestellt. Die ursprüngliche Kornverteilung des Filtergemisches F1A3 vor der Versuchsdurchführung weicht nur geringfügig vom Filter F1A2 im Bereich von d_{30} bis d_{50} ab, sodass F1A3 gröberes Material bei sonst annähernd gleichem Abstandsverhältnis ($d_{15F}/d_{85B} = 4,3$) und gleicher Ungleichförmigkeit ($d_{60F}/d_{10F} = 6,6$) aufweist.

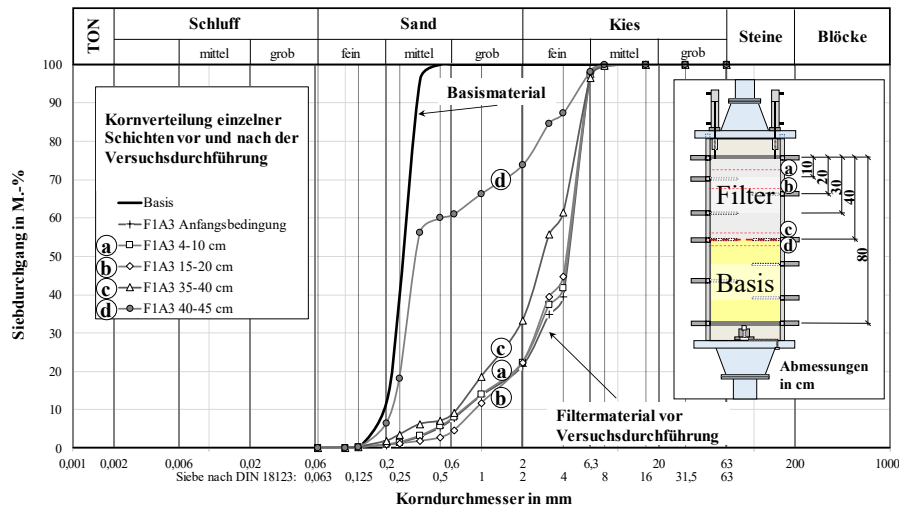


Abb. 5.4: Kornverteilung des Basis- und Filtermaterials (in den Schichten a - d) vor und nach der Durchführung der Modellversuche (Filterkonfiguration F1A3)

Trotz der höheren Ungleichförmigkeit der Filterkonfiguration F1A3 gegenüber F1A2 können deutlich geringere Veränderungen des Filters beobachtet werden. Ein direkter Vergleich der Filterkonfigurationen F1A3 und F1A2 ist aufgrund der unterschiedlichen hydraulischen Belastungen nicht möglich. Nach Ausbau der Probe ergeben sich leichte Zunahmen des Feinanteils und im Bereich der Schichtgrenze bis zur Mitte des Filters (20 cm oberhalb der Schichtgrenze). Im Basismaterial wird in der oberen Schicht (40 - 45 cm) eingesunkenes Filtermaterial aufgefunden, wie in der Kornverteilung (Schicht d) zu erkennen ist. Eine Durchmischung des Basis- und Filtermaterials tritt somit im Bereich von 20 bis 45 cm auf. Die Ungleichförmigkeit des Filtermaterials ändert sich hierbei nur geringfügig.

Die Kornverteilungen der Filterkonfiguration F1B1 (weit gestuft, $U_F = 5,5$) sind in Abbildung 5.5 über die einzelnen Schichten dargestellt.

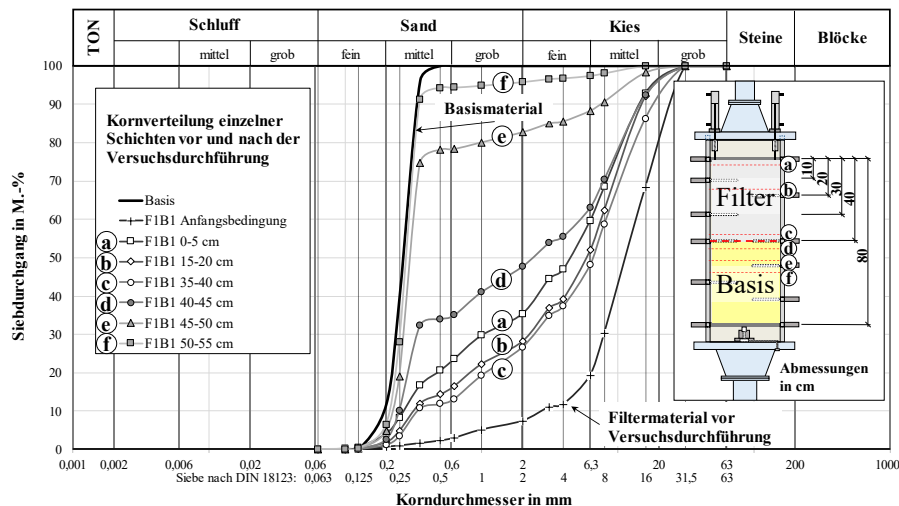


Abb. 5.5: Kornverteilung des Basis- und Filtermaterials (in den Schichten a - f) vor und nach der Durchführung der Modellversuche (Filterkonfiguration F1B1)

Beim Einbau der Filterkonfiguration F1B1 wird durch die Beprobung eine Ungleichförmigkeit von $d_{60F}/d_{10F} = 5,5$ und ein Abstandsverhältnis zum Basismaterial von $d_{15F}/d_{85B} = 19,9$ ermittelt. Beim Mischen des weitgestuften Materials unter Wasser werden Nestbildungen festgestellt, wodurch die Stichprobe von dem gewählten Mischverhältnis der gesamten Probe abweicht. Im Vergleich zwischen der

Kornverteilung aus der Filterbemessung zur Stichprobe beim Einbau ergeben sich Unterschiede insbesondere im Bereich der feineren Kornfraktionen. Der Korndurchmesser bei 10 % Massendurchgang (d_{10}) beträgt in der Stichprobe beim Einbau $d_{10} = 2,6$ mm statt $d_{10} = 0,85$ mm.

Die Kornverteilungen unterschiedlicher Schichten der Filterkonfiguration F1C1 (sehr eng gestuft, geringes Abstandsverhältnis) sind in Abbildung 5.6 dargestellt. Die Filterkonfiguration F1C1 besteht aus einem sehr eng gestuften Filtermaterial ($U = d_{60F}/d_{10F} = 2,3$) mit einem geringen Abstandsverhältnis zum Basismaterial ($A = d_{15F}/d_{85B} \approx 2$).

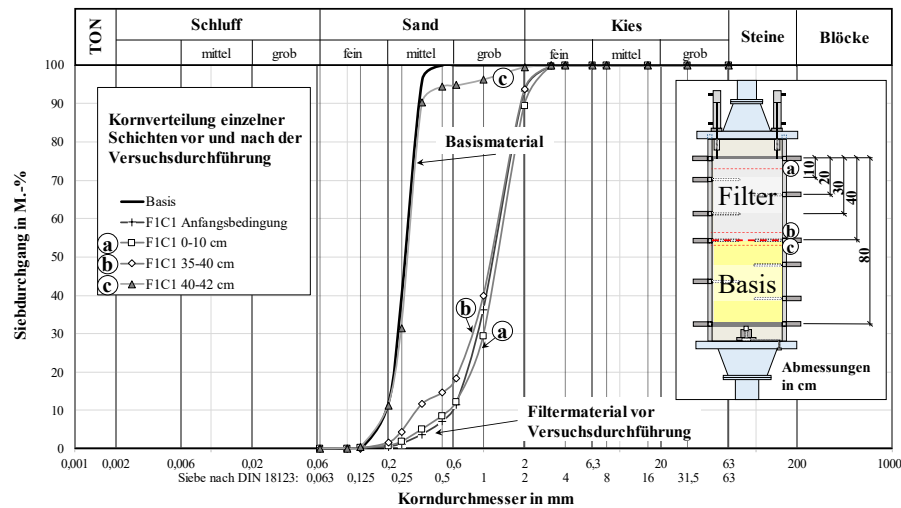


Abb. 5.6: Kornverteilung des Basis- und Filtermaterials (in den Schichten a - c) vor und nach der Durchführung der Modellversuche (Filterkonfiguration F1C1)

Aus den Kornverteilungen des Filtermaterials in den Schichten oberhalb der Schichtgrenze sind während der Versuchsdurchführung kaum Veränderungen eingetreten. Im Bereich der Schichtgrenze bis 5 cm oberhalb ändert sich der Korndurchmesser d_{10F} geringfügig von $d_{10F} = 0,5$ mm auf $d_{10F} = 0,3$ mm durch Eintrag des Basismaterials. Diese Filterkonfiguration kann aufgrund der geringen Veränderungen an der Schichtgrenze als statisch stabil eingestuft werden.

Die Kornverteilungen der Filterkonfiguration F2A1 sind in Abbildung 5.7 dargestellt.

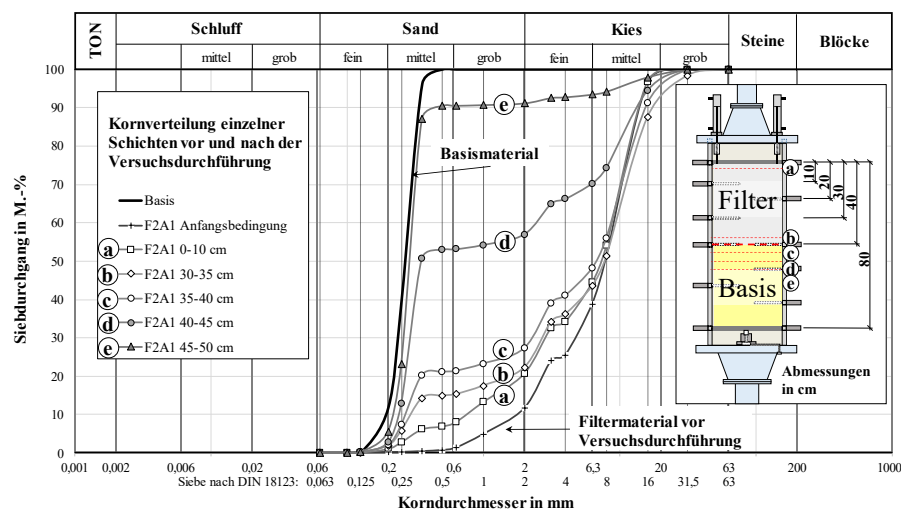


Abb. 5.7: Kornverteilung des Basis- und Filtermaterials (in den Schichten a - e) vor und nach der Durchführung der Modellversuche (Filterkonfiguration F2A1)

Im Vergleich der Kornverteilung zum Anfangszustand und zum Endzustand zeigen sich deutlich die Einträge des feineren Basismaterials im Porenraum des Filters abnehmend von der Schichtgrenze (Schicht d) bis zu Filteroberkante (Schicht a). Der Korndurchmesser bei 10 % Massendurchgang nimmt von $d_{10F} = 1,9$ auf $d_{10F} = 0,3$ mm ab, sodass die Durchlässigkeit der Schicht deutlich abnimmt. Zwischen den Bereichen 5 cm oberhalb (Schicht c) und 5 cm unterhalb der Schichtgrenze (Schicht d) ist zum einen der Eintrag des Basismaterials in den Filter sowie auch das Einsinken des Filtermaterials in das Basismaterial zu erkennen. Bis zu 10 cm unterhalb der Schichtgrenze (Schicht e) wird Filtermaterial in der Basisschicht aufgefunden. Die Kornverteilung der Filterkonfiguration F2A2 ist in unterschiedlichen Schichten in Abbildung 5.8 dargestellt.

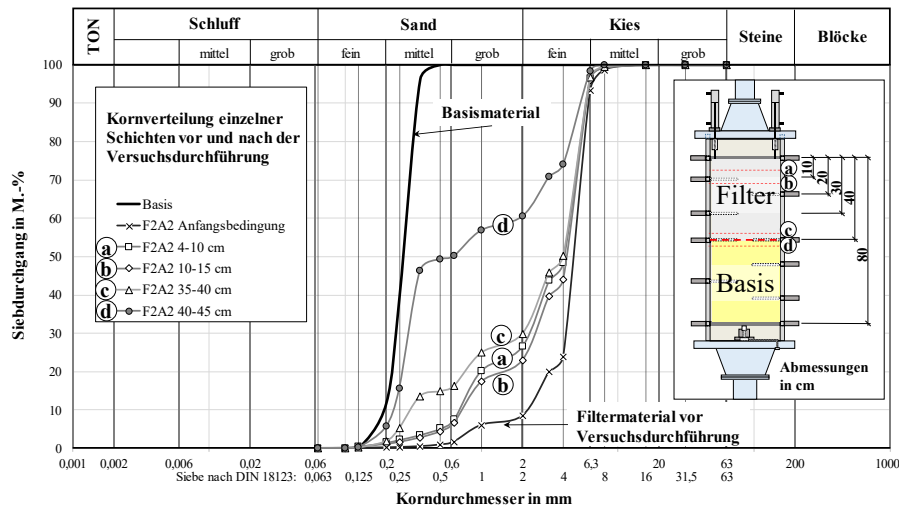


Abb. 5.8: Kornverteilung des Basis- und Filtermaterials (in den Schichten a - d) vor und nach der Durchführung der Modellversuche (Filterkonfiguration F2A2)

Nach der Versuchsdurchführung ist eine deutliche Zunahme des Feinanteils im Bereich des Korndurchmessers bei 10 % Massendurchgang d_{10} zu erkennen. Diese Änderungen sind insbesondere im Bereich der Schichtgrenze erkennbar und können dem Prozess der Kontakterosion zugewiesen werden. Je größer der Abstand zur Schichtgrenze ist, desto größer ergibt sich der Korndurchmesser d_{10} . Bis zu einem Abstand von 5 cm unterhalb der Schichtgrenze sinkt das Filtermaterial in die Basisschicht ein.

Die Kornverteilungen geben Aufschluss über die Kontakterosion, Infiltration und Suffosion. Damit ist eine wichtige Grundlage zur Bewertung der Filterstabilität gegeben. In den Filtermaterialien konnte mit Ausnahme der Filterkonfiguration F1C1, der Transport des erodierten Basismaterials im Porenraum des Filters in den Kornverteilungen nachgewiesen werden. Hierdurch wird bei hoher hydraulischer Belastung eine deutliche Zunahme des Feinanteils im Filter und folglich eine Abnahme des Abstandsverhältnisses, der Durchlässigkeit sowie eine Zunahme der Ungleichförmigkeit festgestellt. Dieses dynamische Filterverhalten kann zu einem semi-stabilen und dynamisch-stabilen Filter führen, wobei nach anfänglichen Infiltrationsprozessen die hydraulische Stabilität des Filters bei gleicher hydraulischer Einwirkung erhöht wird. Zur Erreichung der dynamischen Filterstabilität ist neben der Kontakterosion auch die innere Erosion im Porenraum des Filters (Suffosion) zu beachten. Aufgrund der Veränderungen der geohydraulischen Eigenschaften des Filteraufbaus ist es erforderlich, die hydraulischen Prozesse im Filter im stabilen Filterzustand zu bewerten, um Einflüsse aus der Materialumlagerung zu vermeiden.

5.1.2 Innere Erosion im Filter

Das beobachtete Verhalten der Probe gilt es in die einzelnen geohydraulischen Prozesse zu zerlegen, zu analysieren und zu bewerten. Die Hauptursache für die Materialumlagerung ergibt sich aus der Kontakterosion an der Schichtgrenze zwischen Basis und Filter. Dieser Prozess wird jedoch von Suffosion beeinflusst. Ein suffosives Filtermaterial begünstigt die Kontakterosion, da das eingetragene Basismaterial im Porenraum des Filters weiter transportiert wird. Bei einem mehrstufigen Filter wird die Kontakterosion ebenfalls durch die weiteren Filterstufen beeinflusst. Die untersuchten Filtermaterialien F1A und F1B, F1C und F2A können nach Kenney und Lau (1985) und Ziems (1968) als nicht suffosiv eingestuft werden, da die jeweiligen Korndurchmesser der feineren Kornfraktionen F größer als der vorhandene Porendurchmesser der Fraktion H_M (zwischen d und $4 \cdot d$) ist (siehe Abschnitt 2.1.4). In Abbildung 5.9 sind die Filterkonfigurationen im F/H_M -Diagramm nach Kenney und Lau (1985) aufgetragen. Die Filtermaterialien liegen unterhalb der kritischen Grenze $H_M = 1$ und sind somit stabil gegenüber Suffosion.

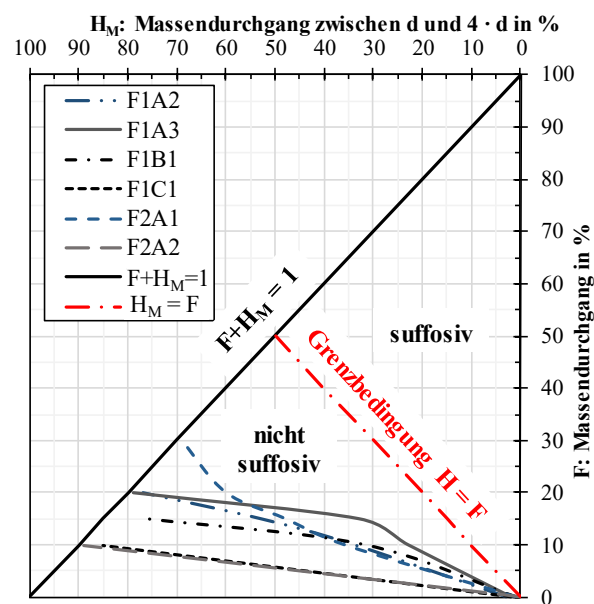


Abb. 5.9: Suffosionsstabilität der Filterkonfigurationen nach Kenney & Lau (1985), mit dem Masseanteil F der Körner $< d$ und dem Masseanteil H zwischen Korndurchmesser d und $4 \cdot d$

Die Bewertungen der inneren Stabilität (Suffosion) der verwendeten Filtermaterialien mit dem Ansatz von Kenney und Lau (1985) wird durch die Siebanalysen aus Abschnitt 5.1.1 und visuellen Beobachtungen während der Versuchsdurchführung gestützt. Es wird kein Transport des Feinanteils des Filtermaterials festgestellt. Daher sind Bewegungen innerhalb des Porenraums des Filters der Kontakterosion und des daraus resultierenden Transports des infiltrierten Basismaterials zuzuordnen.

Zur Bewertung der Filterstabilität ist neben der Stabilität gegenüber Kontakterosion eine Einordnung der inneren Stabilität erforderlich. Die visuellen Beobachtungen und die Untersuchungen der Kornverteilungen geben Aufschluss über die innere Stabilität des Filters. Aus den Beobachtungen und dem Ansatz nach Kenney und Lau (1985) sind die untersuchten Filtermaterialien nicht suffosiv. Weiterhin kann der Transport im Porenraum des Filters dem infiltrierten Basismaterial zugeordnet werden. Das enggestufte Basismaterial ist ebenfalls nicht suffosiv und wird durch Kontakterosion in den Porenraum des Filters infiltriert.

5.1.3 Einfluss der Erosionsprozesse auf die geohydraulischen Bodeneigenschaften

Die geometrischen Eigenschaften des Basis- und Filtermaterials sind im Abschnitt 3.2.2 in Tabelle 3.3 mit Abstandsverhältnis, Ungleichförmigkeit und Krümmungszahl dargestellt. Durch Kontakterosion und die damit verbundene Infiltration, Kolmation oder Suffosion des Basismaterials im Filter ergeben sich nach der Versuchsdurchführung Veränderungen der Kornverteilung, wie in Tabelle 5.2 dargestellt.

Tab. 5.2: Veränderung der geometrischen Parameter an der Schichtgrenze (35 - 40 cm) zwischen Anfangs- (t_0) und Endzustand (t_n)

Filter	Abstandsverhältnis A		Ungleichförmigkeit U	
	t_0	t_n	t_0	t_n
	d_{15F}/d_{85B}	d_{15F}/d_{85B}	d_{60F}/d_{10F}	d_{60F}/d_{10F}
F1A1	4,5	3,0	5,9	11,4
F1A2	4,5	3,0	5,9	11,4
F1A3	4,3	3,2	6,6	5,7
F1B1	19,9	1,0	5,5	22,3
F1C1	2,3	1,9	2,3	3,7
F2A1	8,3	1,1	4,8	33,3
F2A2	9,9	1,9	2,5	16,6

*) Zeitpunkt der Beprobung: t_0 ist der Zeitpunkt beim Einbau der Probe vor Versuchsdurchführung und t_n ist der Zustand nach Versuchsdurchführung und Ausbau der Probe

Durch Infiltration des Basismaterials in den Filter nimmt das Abstandsverhältnis d_{15F}/d_{85B} an der Schichtgrenze (35 – 40 cm) ab und die Ungleichförmigkeit d_{60F}/d_{10F} nimmt zu. In Abbildung 5.10 sind die Kornverteilungen der Filterkonfigurationen vor der Versuchsdurchführung und in Abbildung 5.11 zum Endzustand nach der Versuchsdurchführung dargestellt. Es wird eine deutliche Änderung der Kornverteilung im Bereich unterhalb d_{50} durch den Eintrag des Basismaterials im Porenraum des Filters sichtbar.

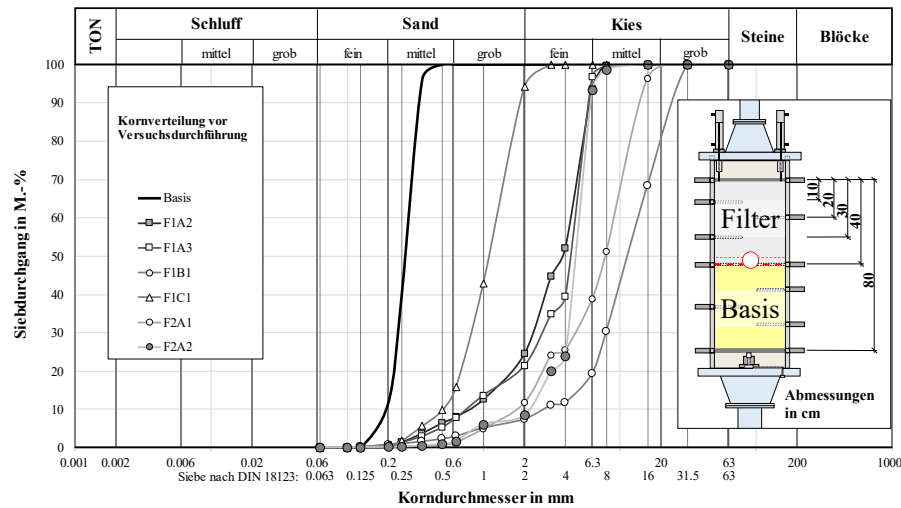


Abb. 5.10: Kornverteilung der Filtermaterialien an der Schichtgrenze (35 - 40 cm) vor Versuchsdurchführung

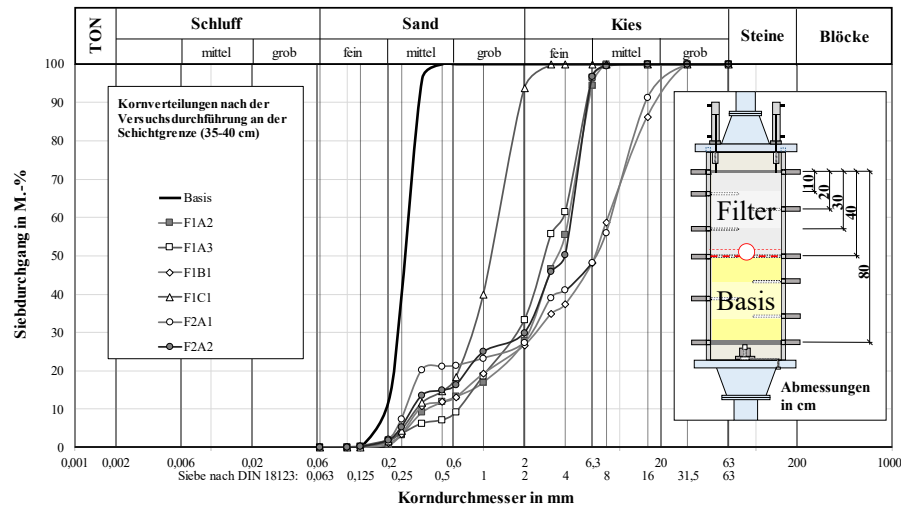


Abb. 5.11: Kornverteilungen der Filtermaterialien an der Schichtgrenze (35 - 40 cm) nach Versuchsdurchführung

Durch die Verwendung des gleichen Basismaterials in allen Versuchen ergibt sich eine Annäherung des Feinanteils in der Filterschicht (35- 40 cm) zu dem Basismaterial im Bereich von 0 % bis 30 % Massendurchgang. Hierdurch entsteht zum einen ein größerer Widerstand des Filters gegenüber Kontakterosion durch kleinere Porendurchmesser aber auch zum anderen eine Steigerung des hydraulischen Gradienten oberhalb der Schichtgrenze durch die abnehmende Durchlässigkeit. Kommt dieser Prozess bei gleichbleibender hydraulischer Belastung zum Erliegen handelt es sich um einen dynamisch stabilen Filter.

Aus der Kornverteilung ergeben sich folgende Änderungen zwischen den Zeitpunkten vor und nach der Versuchsdurchführung. Die Filterkonfigurationen weisen Abweichungen im Vergleich zur theoretischen Kornverteilung aus der vorangegangenen Bemessung auf. Diese Abweichungen entstehen durch Zusammenstellen und Mischen des Filtermaterials unter Wasser, durch Entmischung bei der Probenahme und durch die Siebanalyse dieser Stichprobe. Anhand der Ergebnisse aus der Siebanalyse kann das Verhalten des Filters wie folgt beschrieben werden:

Kontakterosion und Infiltration des Basismaterials im Porenraum des Filters führt zur:

- Reduzierung des Abstandsverhältnisses d_{15F}/d_{85B} durch höheren Feinanteil im Filter (d_{15F})
- Erhöhung der Ungleichförmigkeit d_{60F}/d_{10F} durch höheren Feinanteil im Filter (d_{10F})
- Reduzierung der Durchlässigkeit und Steigerung des hydraulischen Gradienten oberhalb der Schichtgrenze durch höheren Feinanteil im Filter (d_{10F})

Innere Erosion des Basismaterials im Filter führt zur:

- Erhöhung der Durchlässigkeit oberhalb der Schichtgrenze
- Reduzierung des hydraulischen Gradienten oberhalb der Schichtgrenze

Einsinken des Filtermaterials in die Basisschicht führt zur:

- Verschiebung der Schichtgrenze und damit zur
- Änderung der Lage des maximalen hydraulischen Gradienten

Durch die Veränderung der Kornverteilungen in Form einer durchmischten Schicht aus Basis- und Filtermaterial lassen sich Änderungen der geohydraulischen Eigenschaften (Durchlässigkeit, Strömungsregime und vertikale Verlagerung des kritischen hydraulischen Gradienten) ableiten. Diese Umlagerungsprozesse werden in Kapitel 6 in Zusammenhang mit den zugrundeliegenden hydraulischen Prozessen gebracht. Es ist hierzu sinnvoll, die Untersuchungen der hydraulischen Prozesse im Filteraufbau sowie des Zusammenhangs zwischen Wellenparametern und hydraulischem Gradienten für den stabilen Filterzustand, ohne die Einflüsse der Kontakterosion (Infiltration, Suffosion und Kolmation), durchzuführen.

5.2 Verformungsverhalten und Spannungsverteilung

Die vertikale Verformung der Probe ist die Folge aus dem Zusammenwirken von bodendynamischen Prozessen. Zum einen treten kurzzeitige Verformungen innerhalb einer Wellenperiode und zum anderen fortschreitende Verformungen über die Dauer einer Versuchsreihe auf. Die ursächlichen Prozesse dieser Verformung entstehen durch die Filterauflast, den hydrostatischen und hydrodynamischen Druck sowie durch die Kontakterosion des Basismaterials an der Grenze zur Filterschicht. In Abbildung 5.12 ist der Verlauf der vertikalen Verformung als Setzung der Filteroberkante über die Dauer einer Versuchsreihe im Labor (am Beispiel der Filterkonfiguration F1A2) dargestellt.

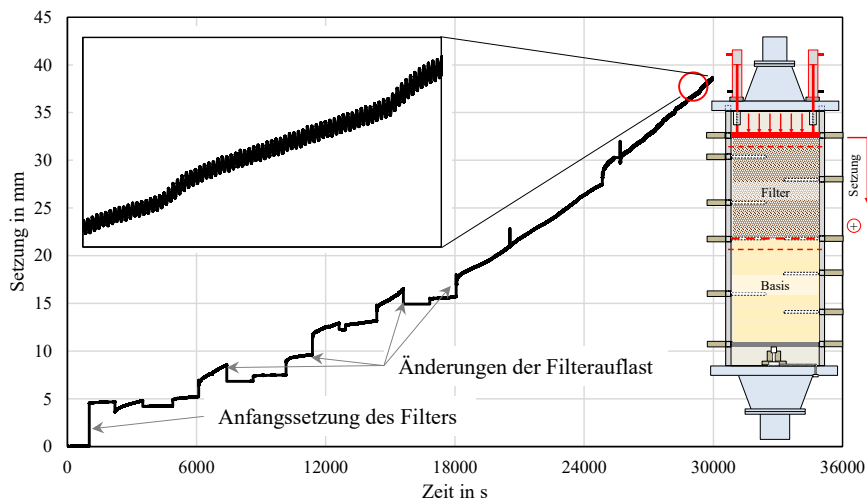


Abb. 5.12: Gemessene vertikale Verformung der Filteroberkante (F1A2) im Labor

In Abbildung 5.12 ist die vertikale Verformung mit zwei Komponenten, der transienten (kurzzeitigen) Verformungen (im Detailausschnitt) und der fortschreitenden (verbleibenden) Verformung zu erkennen. Die transienten Verformungen werden durch den dynamischen Porenwasserdruck erzeugt und sie entsprechen den elastischen Verformungen der Bodenprobe (siehe auch Abschnitt 2.2.2). Zusätzlich treten Unstetigkeiten im Verformungsverlauf durch Änderungen der Filterauflast und des hydrostatischen Drucks auf. Ebenfalls entstehen durch die Anlaufphasen in der Versuchsanlage für jeden Versuch eine anfängliche Verdichtung der Probe, sodass eine Anfangssetzung verzeichnet wird.

Die Verformungsmessung unterliegt im Laborexperiment einem Modelleffekt durch die Ausdehnung der Bodenprobe in der Versuchszelle in vertikaler und axialer Richtung. Durch die Änderung des Zellenvolumens mit zunehmendem Druck und zunehmender Auflast wird die gemessene Wegstrecke an der Filteroberkante größer. Durch die Vorspannung der Zellenwand und des Zellendeckels wurde dieser Effekt soweit reduziert, dass die Ausdehnung sehr klein und damit vernachlässigbar wird (siehe Abschnitt 3.1.2).

In Abbildung 5.13 ist die vertikale Verformung der Filterschicht im Vergleich zwischen dem Anfangszustand und dem Endzustand nach der Versuchsdurchführung dargestellt. Das Ergebnis der Videoanalyse ist schematischen Abbildungen zur Verdeutlichung gegenübergestellt.

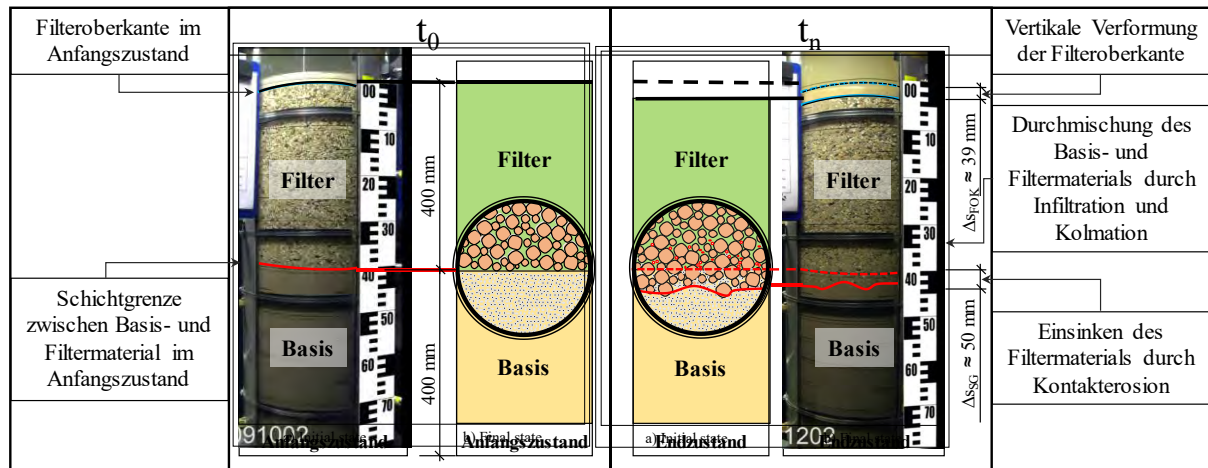


Abb. 5.13: Beobachtete vertikale Verformung und Materialumlagerung des Basis- und Filtermaterials infolge Kontakterosion (Filterkonfiguration F1A2)

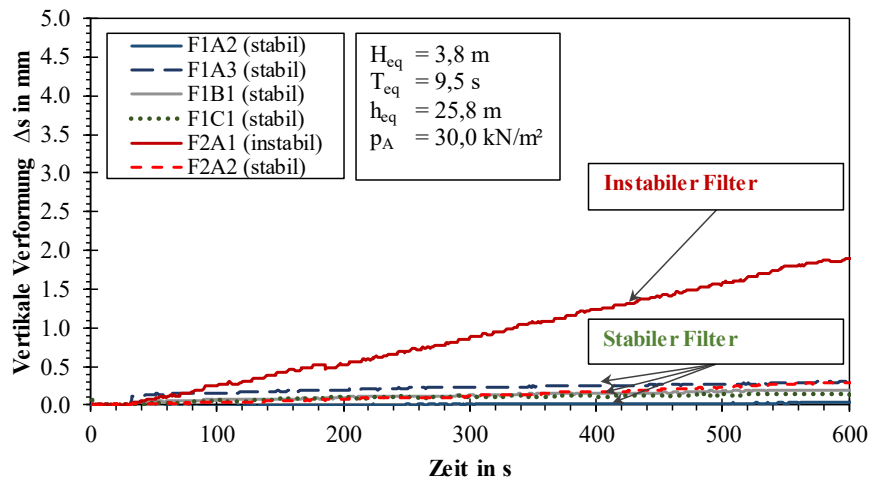
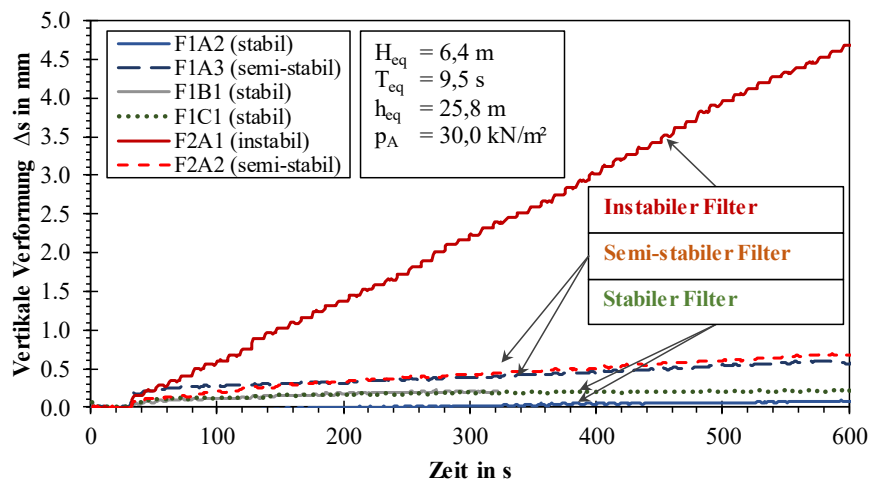
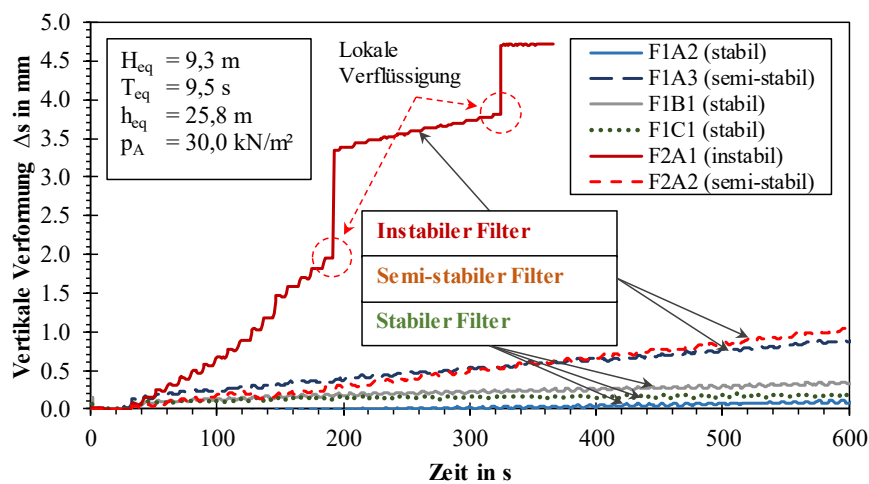
Zwischen dem Anfangs- und Endzustand einer Versuchsreihe wird die vertikale Verformung an der Filteroberkante und an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filterschicht in der schematischen Darstellung (Abbildung 5.13) deutlich erkennbar. Durch die synchrone Auswertung der Setzungsmessung und der Videoaufzeichnung kann der Zusammenhang zwischen der vertikalen Verformung der Filteroberkante und dem Einsinken des Filtermaterials sowie der Verschiebung der Schichtgrenze festgestellt werden. Im Beispiel der Filterkonfiguration F1A2 wird eine vertikale Verformung der Filteroberkante von $\Delta s_{FOK} \approx 39$ mm und eine Verschiebung der Schichtgrenze von $\Delta s_{SG} \approx 50$ mm erreicht. Die Verformung an der Oberkante fällt im Vergleich zur Verformung an der Schichtgrenze geringer aus, da die Zone der Durchmischung von Basis- und Filtermaterial an der Schichtgrenze ein größeres Volumen gegenüber der gesamten Volumenänderung der Probe aufweist. Damit zeigt sich, dass die vertikale Verformung an der Filteroberkante durch die Kontakterosion an der Schichtgrenze hervorgerufen wird. Die Wegmessung an der Filteroberkante eignet sich somit als Indikator für die Kontakterosion an der Schichtgrenze und als Kriterium zur Bewertung der Stabilität des Filters.

5.2.1 Bewertung der Filterstabilität anhand des Verformungsverhaltens

Zu jeder hydraulischen Laststufe werden die Verläufe der vertikalen Verformung analysiert, um eine Einstufung der Stabilität des Kornfilters zu erreichen. In Abbildung 5.14 sind die Zeitreihen der vertikalen Verformung der Filteroberkante in Abhängigkeit der äquivalenten Wellenhöhe H_{eq} (mit einer Wellenperiode $T_{eq} = 9,5$ s in der Wassertiefe $h_{eq} = 25,8$ m und mit einer konstanten Auflast von $p_A = 30,0$ kN/m²) dargestellt. Die nach unten gerichtete vertikale Verformung Δs ist nachfolgend mit positivem Vorzeichen versehen.

Die Einteilung der Filterstabilität erfolgt anhand der Steigung des Verformungsverlaufs Δs (nach der Anlaufphase von 180 s) in der Einheit mm/min mit folgenden Grenzen (siehe Abbildung 5.14):

- *stabil*: vertikale Verformung $\Delta s < 0,1$ mm/min
- *semi-stabil*: vertikale Verformung $\Delta s \geq 0,1$ mm/min
- *instabil*: vertikale Verformung $\Delta s \geq 0,3$ mm/min

a) Vertikale Verformung der Filteroberkante Δs ($H_{eq} = 3,8 \text{ m}$)b) Vertikale Verformung der Filteroberkante Δs ($H_{eq} = 6,4 \text{ m}$)c) Vertikale Verformung der Filteroberkante Δs ($H_{eq} = 9,3 \text{ m}$)Abb. 5.14: Zeitreihen der vertikalen Verformung Δs (gemessen an der Filteroberkante) in Abhängigkeit der Wellenhöhe H_{eq} ($T_{eq} = 9,5 \text{ s}$; $h_{eq} = 25,8 \text{ m}$)

Die vertikale Verformung der Filteroberkante in Abbildung 5.14. gibt Aufschluss über das geohydraulische Verhalten der untersuchten Filterkonfigurationen. In Abbildung 5.14 a) ist der Verlauf der Filterkonfiguration F2A1 durch eine höhere Steigung des Verformungsverlaufs infolge der fortschreitenden Kontakterosion charakterisiert. Die Filterkonfigurationen F1A2, F1A3, F1B1, F1C1 und F2A2 unterscheiden sich hiervon deutlich durch eine sehr geringe Steigung sowie durch eine sehr geringe absolute Verformung Δs und können bei dieser hydraulischen Belastung als stabil eingestuft werden.

In Abbildung 5.14 b) bleiben F1A2, F1B1 und F1C1 stabil, während F1A3 und F2A2 semi-stabiles Verhalten durch eine größere Steigung bei einer relativ geringen absoluten Verformung Δs aufweisen. Die Filterkonfiguration F2A1 weist bei dieser hydraulischen Belastung, durch die Steigerung der äquivalenten Wellenhöhe von $H_{eq} = 3,8$ m auf 6,4 m, eine höhere Steigung auf.

Der gleiche Trend setzt sich in Abbildung 5.14 c) mit stabilem Verhalten der Filterkonfigurationen F1A2, F1B1 und F1C1, semi-stabilem Verhalten der Filterkonfigurationen F1A3 und F2A2 sowie instabilem Verhalten der Konfiguration F2A1 fort. Das Filtermaterial F2A1 zeigt Besonderheiten durch große Sprünge in dem Verformungsverlauf infolge der lokalen Verflüssigung an der Schichtgrenze. Durch die Erosion des Basismaterials an der Kontaktfläche zum Filter entstehen Hohlräume, wodurch der Filter plötzlich (um bis zu 1,5 mm) nachsackt.

5.2.2 Vergleich von unidirektionaler und oszillierender Strömung

Die Stabilität geometrisch offener Kornfilter gegenüber Kontakterosion ist abhängig vom einwirkenden hydraulischen Gradienten. Zur Bewertung der hydraulischen Stabilität im Vergleich von unidirektionaler und oszillierender Strömung wird jeweils der gleiche hydraulische Gradient $i_{6,5} \approx 6,1$ eingesteuert. In Abbildung 5.15 a) ist dazu der erzeugte hydraulische Gradient $i_{6,5}$ an der Schichtgrenze und in Abbildung 5.15 b) die vertikale Verformung dargestellt.

Der hydraulische Gradient $i_{6,5}$ wird unter unidirektionaler Strömung mit einem konstanten Druckunterschied Δh im Vergleich zum dynamischen Druckunterschied unter oszillierender Strömung erzeugt (Abbildung 5.15 a)). Während sich im Fall der unidirektionalen Strömung keine vertikale Verformung einstellt zeigt sich eine fortschreitende Verformung unter oszillierender Strömung (Abbildung 5.15 b)). Hieraus lässt sich eine wesentlich geringere Stabilität unter oszillierender Strömung im Vergleich zur unidirektionalen Strömung ableiten. Daraus folgt weiter, dass geometrische Filterkriterien für die Bemessung von Kornfiltern unter welleninduzierter Strömung nicht ohne weitere Prüfung der hydraulischen Bedingungen angewendet werden können (siehe auch Abschnitt 2.1.4).

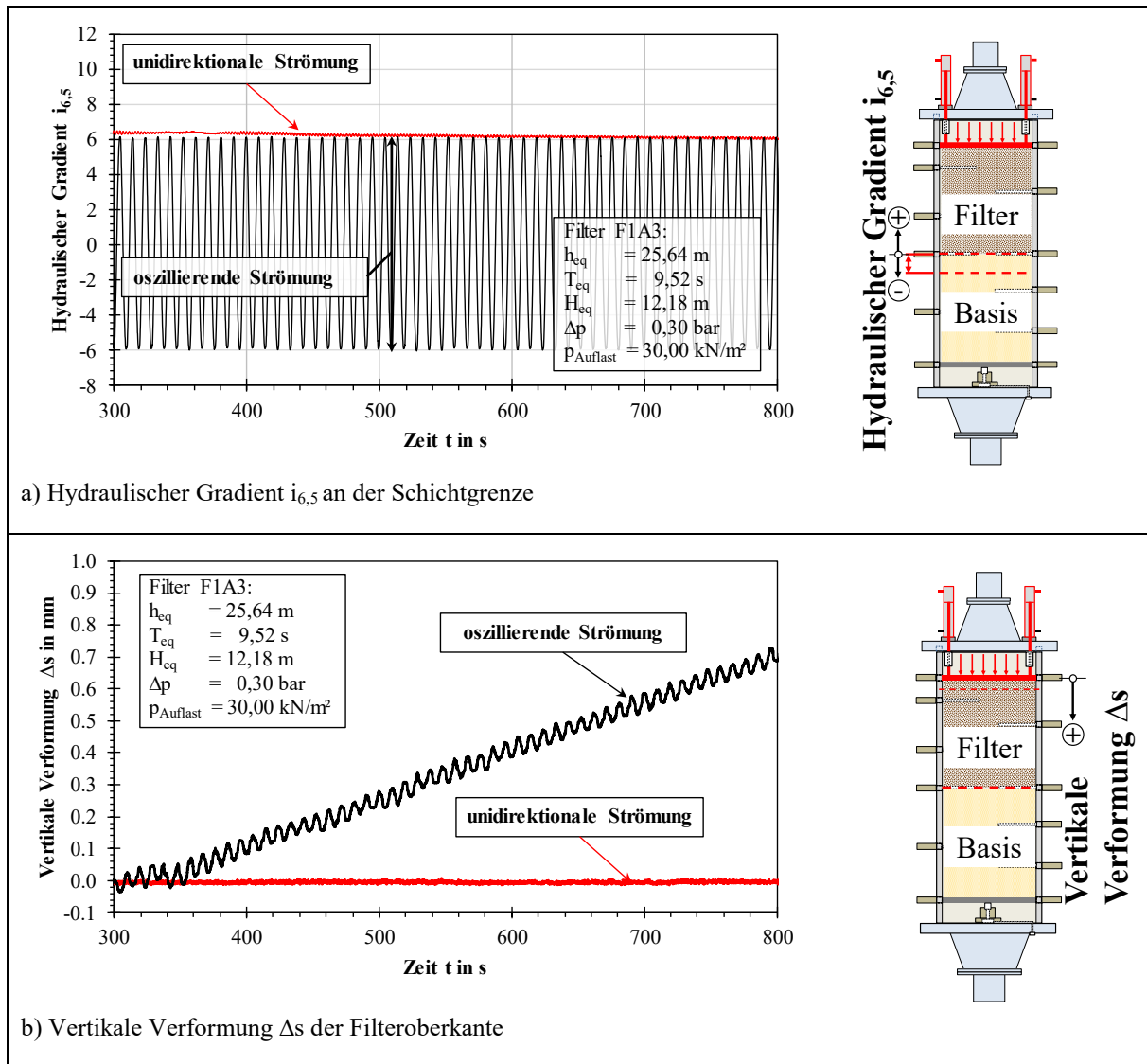


Abb. 5.15: Hydraulischer Gradient $i_{6,5}$ an der Schichtgrenze und vertikale Verformung im Vergleich zwischen gleichgerichteter und oszillierender Strömung

5.2.3 Spannungsverteilung und vertikale Verformung

Die vertikale Verformung der Filteroberkante kann auf folgende Prozesse zurückgeführt werden:

- Elastische Verformung des Basis- und Filtermaterials durch Änderung des Porenwasserdrucks
- Plastische Verformung durch Verdichtung des Basis- und Filtermaterials
- Kontakterosion sowie Infiltration des Basismaterials an der Grenze zur Filterschicht
- Auffüllung des Porenraums im Filter und Änderung der tragenden Bodenmatrix
- Einsinken des Filtermaterials an der Schichtgrenze

Die Verformung der Probe wird bestimmt durch die dynamische Druckänderung, die Änderung des hydrostatischen Drucks und durch die gesteuerte Filterauflast. Durch die Wände der Zelle und die begrenzte Schichtdicke des Basismaterials wird die Spannungsverteilung und damit auch die Verformung beeinflusst. An der Wandung der Zelle ist die Reibung geringer im Vergleich zur inneren Reibung der Probe. Näherungsweise lassen sich nach dem Mohr-Coulombschen Modell die eindimensionale Spannungs- und Verformungsverteilung mit dem FEM-Programm Plaxis 2D ermitteln (Abbildung 5.16).

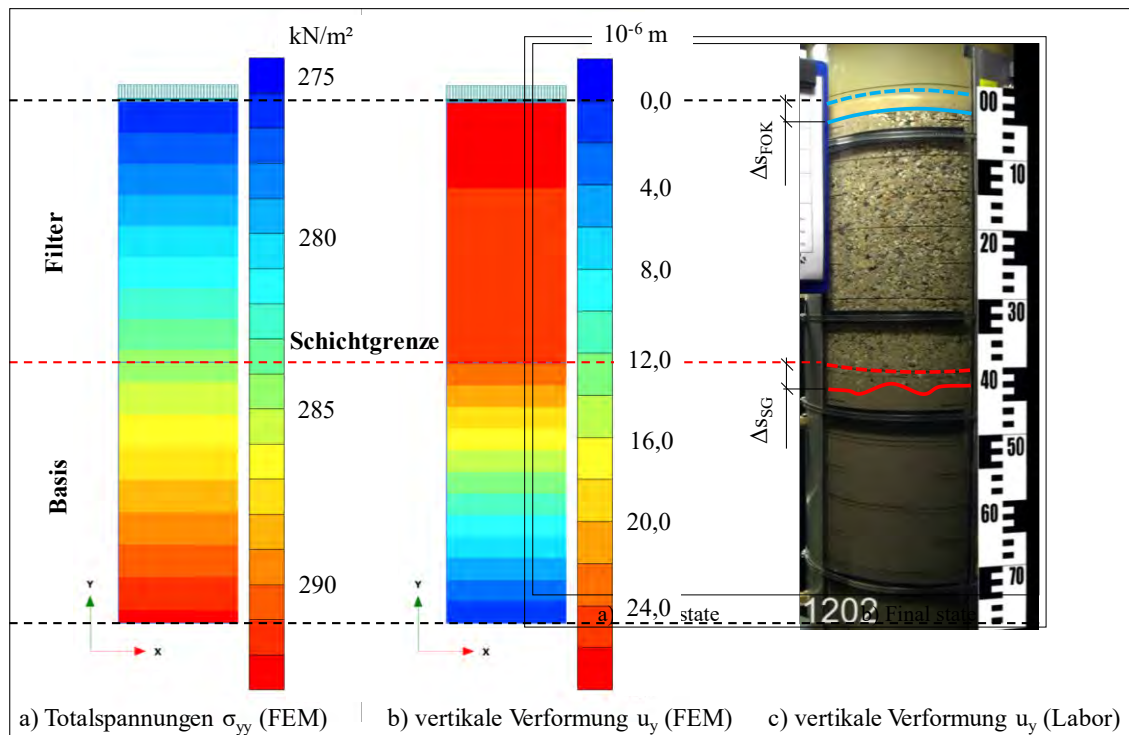


Abb. 5.16: Totalspannung, vertikale Verformung und visuelle Beobachtung der Verformung (Probe F1A2)

Durch die Auflast von $p_A = 30 \text{ kN/m}^2$ an der Filteroberkante und den hydrostatischen Druck bei 25 mWs entstehen sehr geringe Verformungen im Bereich von $2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ bis $28 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$. In der Filterschicht (oben) entstehen größere Verformungen im Vergleich zur Basisschicht (unten). Diese vertikalen Verformungen sind damit im Vergleich zu den beobachteten Verformungen durch Kontakterosion vernachlässigbar klein.

Die transiente Verformung der Filteroberkante kann somit der elastischen Verformung des Basis- und Filtermaterials durch Änderung des Porenwasserdrucks zugeordnet werden. Die fortschreitende Setzung (residuelle Verformung) entsteht durch (i) Kontakterosion des Basismaterials an der Grenze zur Filterschicht, (ii) Auffüllung des Porenraums im Filter und (iii) Einsinken des Filtermaterials an der Schichtgrenze. Die vertikale Verformung eignet sich daher als Indikator der Kontakterosion und die abgeleitete Steigung des Setzungsverlaufs wird als Bewertungskriterium der Filterstabilität verwendet. Die Stabilität des Filters kann anhand der vertikalen Verformung Δs wie folgt klassifiziert werden:

- *statisch stabil*: $\Delta s < 0,1 \text{ mm/min}$
- *semi-stabil (Bewegungsbeginn)*: $\Delta s \geq 0,1 \text{ mm/min}$
- *instabil*: $\Delta s \geq 0,3 \text{ mm/min}$

Weiterhin gibt der Verlauf der vertikalen Verformung Aufschluss über eine Steigerung der Erosionsprozesse, wie bei der plötzlichen lokalen Verflüssigung, sowie über eine Abnahme durch Selbstheilungsprozesse, wie der Kolmation des Filters.

5.3 Klassifizierung der Filterstabilität

Die Analyse der hydraulischen Prozesse erfordert die Kenntniss über den Stabilitätszustand sowie vergleichbare geohydraulische Bedingungen. Hierzu ist es zweckmäßig, die Filterstabilität anhand des Verformungsverhaltens zu bewerten und eine Klassifizierung der Stabilität vorzunehmen. Die Analyse der hydraulischen Prozesse wird anschließend für den stabilen Filterzustand ohne Materialumlagerung durchgeführt, um Störeinflüsse aus Änderungen der Durchlässigkeit, der Porengeometrie und der Probengeometrie zu reduzieren. Die Klassifizierung erfolgt durch folgende Methoden:

- Visuelle Beobachtung
 - des Bewegungsbeginns an der Schichtgrenze durch Kontakterosion (lokale Verflüssigung des Basismaterials unterhalb der Schichtgrenze)
 - der Verlagerung der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filterschicht
 - der Durchmischung von Basis- und Filtermaterial
 - des Materialtransports im Porenraum des Filters
- Erfassung der Verformung der Filteroberkante
 - Setzungsverlauf der Filterschicht
 - Verlagerung der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filterschicht

Die Stabilität der Kornfilter wird in drei Klassen eingeteilt und anhand des maximalen bzw. kritischen hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze $i_{(6,5)}$ in Tabelle 5.3 bewertet (siehe Abbildung 5.17):

- *statisch stabil*: Die geotechnischen und geomemetrischen Eigenschaften des Filters bleiben erhalten und es entstehen nur geringe Anfangsverformungen; die Stabilität des Filters ist bis zu dem Erreichen des maximalen hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ gewährleistet (Abbildung 5.17 a)).
- *semi-stabil (Bewegungsbeginn)*: Der Bewegungsbeginn an der Schichtgrenze wird sichtbar und die Anfangssetzung wird überschritten; bis zu dem semi-kritischen Maximalwert $i_{\text{semi-krit}(6,5)}$ kann ein semi-stabiles Verhalten, aber noch kein instabiles Verhalten des Filters beobachtet werden (Abbildung 5.17 b)).
- *instabil*: Die lokale Verflüssigung an der Schichtgrenze ist deutlich sichtbar und die Setzung verläuft fortschreitend; ab einem kritischen hydraulischen Gradienten $i_{\text{krit}(6,5)}$ tritt instabiles Verhalten bzw. das Versagen des Filters auf (Abbildung 5.17 c)).

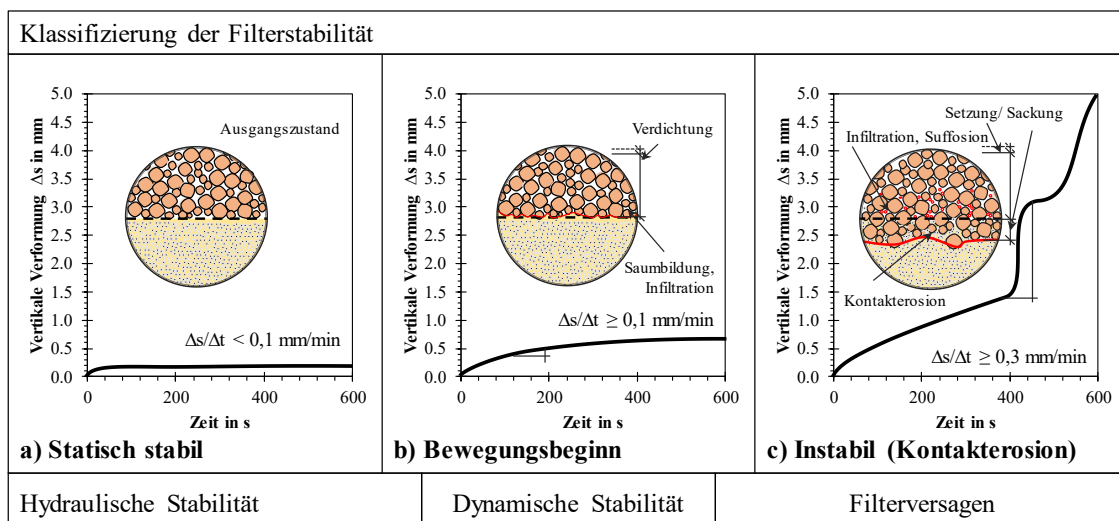


Abb. 5.17: Klassifizierung der Filterstabilität anhand des Setzungsverlaufs und visueller Beobachtungen

Die Klassifizierung der Filterstabilität erfolgt gemäß Abbildung 5.17 anhand der Grenzen der Stabilität (statische Stabilität, Bewegungsbeginn und Kontakterosion). Die Grenzen unterliegen durch die visuelle Beobachtung und indirekte Wegmessung an der Filteroberkante Unsicherheiten, sodass der Bewegungsbeginn zwischen dem höchsten hydraulischen Gradienten zum statisch stabilen und dem niedrigsten hydraulischen Gradienten zum Versagen des Filters ermittelt wird.

Die Ergebnisse zur Stabilität der Kornfilter unter oszillierender Strömung sind in Tabelle 5.3 mit den maximalen und kritischen hydraulischen Gradienten mit den Filterzuständen zusammengefasst.

Tab. 5.3: Kritische hydraulische Gradienten in Abhängigkeit des Filterzustands

Filter	Geotechnische Parameter			Hydraulischer Gradient		
	Abstandsverhältnis	Ungleichförmigkeit	Porosität	Statisch stabil	Bewegungsbeginn	Instabil
	d_{15F}/d_{85B}	d_{60F}/d_{10F}	n_F ¹⁾	$i_{\max(6,5)}$	$i_{\text{semi-krit}(6,5)}$	$i_{\text{krit}(6,5)}$
F1A2	4,5	5,9	0,31	< 4,6	< 7,6	> 9,3
F1A3	4,3	6,6	0,31	< 6,1	< 6,1	> 6,9
F1B1	19,9	5,5	0,31	< 4,8	< 7,9	> 8,0
F1C1	2,3	2,3	0,35	< 13,6	< 24,5	- ²⁾
F2A1	8,3	4,8	0,31	- ³⁾	< 2,7	> 3,1
F2A2	9,9	2,5	0,34	< 5,8	< 5,9	> 5,9

¹⁾ Ansatz nach Beyer und Schweiger (1969) für mittlere Lagerungsdichte $D_{F,\text{mittel}}$ (Abschnitt 2.1.4)

²⁾ Es wurde kein instabiler Zustand erreicht

³⁾ Es wurde kein statisch stabiler Zustand erreicht

Die Wiederholbarkeit der Versuche ist im Vergleich der Filterkonfiguration F1A2 und F1A3 gegeben, wenn auch das Mischen und die Beprobung der Materialien zu Abweichungen in der Kornverteilung führen. Im Vergleich der Wiederholungsversuche zeigt sich, dass ein Bewegungsbeginn im gleichen Bereich von $i_{\max(6,5)} = 4,6$ bis 7,6 (F1A2) und von $i_{\max(6,5)} \leq 6,1$ (F1A3) erreicht wird.

Die Filterkonfiguration F1B1 fällt durch das relativ hohe Abstandsverhältnis von $d_{15F}/d_{85B} = 19,9$ bei einer Ungleichförmigkeit von $d_{60F}/d_{10F} = 5,5$ auf. Das initiale Abstandsverhältnis nimmt im zeitlichen Verlauf des Versuchs durch den Eintrag des Basismaterials deutlich ab (Abschnitt 5.1). Auch hier wird der Bewegungsbeginn im gleichen Bereich von $i_{\max(6,5)} = 4,8$ bis 7,9 erreicht.

Im Gegensatz zu den hydraulisch offenen Filtern erfüllt die Filterkonfiguration F1C1 die Anforderung eines geometrisch geschlossenen Filters durch ein geringes Abstandsverhältnis und einer geringen Ungleichförmigkeit. Bis zu einem Gradienten von $i_{\max(6,5)} \leq 13,6$ konnte keine Materialbewegung oder Setzung beobachtet werden und bis zu $i_{\text{semi-krit}(6,5)} \leq 24,5$ können erste Bewegungen (semi-stabil), aber kein instabiles Verhalten festgestellt werden.

Die Filterkonfiguration F2A1 weist eine große Dynamik mit großer Anfangssetzungen auf. Im Vergleich der Filterkonfigurationen kann bei F2A1 dem stabilen Verhalten kein hydraulischer Gradient zugeordnet werden. Es kann jedoch semi-stabiles Verhalten bis zu $i_{\text{semi-krit}(6,5)} \leq 2,7$ beobachtet werden.

Im Vergleich zwischen den Konfigurationen F2A1 und F2A2 besteht ein ähnliches Abstandsverhältnis jedoch eine geringe Ungleichförmigkeit im Fall der Konfiguration F2A2. Hierdurch liegt ein semi-stabiler Filterzustand bis zu $i_{\text{semi-krit}(6,5)} \leq 5,9$ (F2A2) im Vergleich zu $i_{\text{semi-krit}(6,5)} \leq 2,7$ (F2A1) vor, jedoch beginnt der instabile Bereich jeweils unmittelbar oberhalb dieser Grenzen.

Die Ergebnisse unterliegen Unsicherheiten hinsichtlich der Ermittlung der kritischen hydraulischen Gradienten im Laborversuch aufgrund der geometrischen Änderungen der Probe infolge von Erosionspro-

zessen. Weitere Unsicherheiten entstehen in der Ermittlung des Abstandsverhältnisses und Ungleichförmigkeit durch entmischte Stichproben in der Siebanalyse (siehe Abschnitt 3.2.2). Die Ungleichförmigkeit steht in engem Zusammenhang mit der Porosität und der Lagerungsdichte, die wiederum verantwortlich für die Strömungs- und Transportprozesse im Porenraum des Filters sind (siehe Abschnitt 2.1.4). Eine direkte Erfassung der Porosität ist während der Versuchsdurchführung in der Versuchszelle nicht möglich, daher ist es zweckmäßig, die Porosität n unter dem Einfluss der Lagerungsdichte D und der Ungleichförmigkeit U mit dem Ansatz nach Beyer und Schweiger (1969) zu ermitteln (siehe Abschnitt 2.1.4). Die Porosität der Filtermaterialien n_F kann so anhand der Ungleichförmigkeit U_F für lockerste, mittlere und dichteste Lagerung vor und nach der Versuchsdurchführung ermittelt werden (Abbildung 5.18).

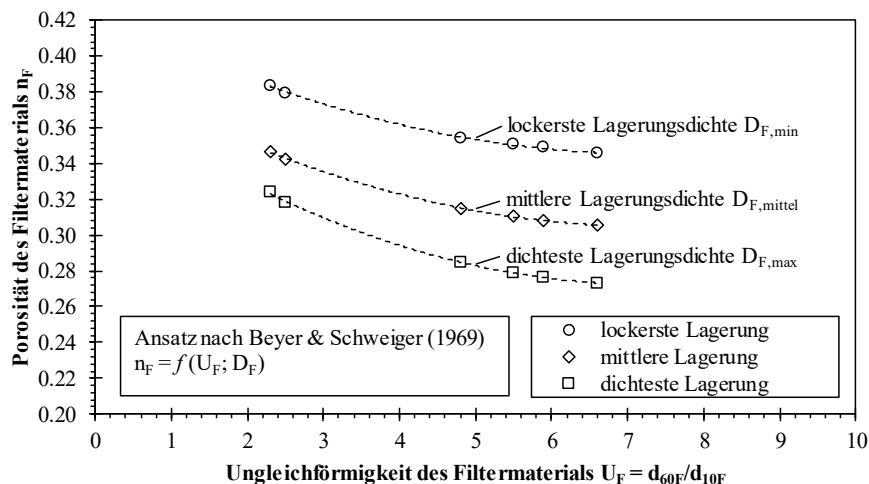


Abb. 5.18: Porosität des untersuchten Filtermaterials vor der Versuchsdurchführung unter dem Einfluss der Lagerungsdichte D_F und der Ungleichförmigkeit U_F mit dem Ansatz nach Beyer und Schweiger (1969)

Aus der Analyse der geohydraulischen Prozesse wird deutlich, dass die kritischen hydraulischen Gradienten erwartungsgemäß mit dem steigenden Abstandsverhältnis d_{15F}/d_{85B} abnehmen. Gleichzeitig ist eine Zunahme des kritischen hydraulischen Gradienten durch geringere Ungleichförmigkeit des Filtermaterials erkennbar. Eine erste Zuordnung der kritischen hydraulischen Parameter zu den geotechnischen (geometrischen) Eigenschaften des Filters wurde durchgeführt.

Einfluss der Porosität: Es bestehen Unsicherheiten bei der Ermittlung der Porosität n durch den Einfluss der Lagerungsdichte D und Ungleichförmigkeit U . Die Ermittlung der Porosität n_F der untersuchten Filtermaterialien erfolgt näherungsweise mit dem Ansatz nach Beyer und Schweiger (1969).

Einfluss der Wellenparameter: Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um den Zusammenhang zwischen den Wellenparametern (Wellenhöhe H , Wellenperiode T in Wassertiefe h) und dem hydraulischen Gradienten herzustellen (siehe Abschnitt 6.1.4). Hierdurch wird es möglich kritische Wellenparameter der hydraulischen Filterstabilität der jeweiligen Filterkonfiguration zuzuordnen.

5.4 Zusammenfassung und Bewertung der Laborergebnisse zu geohydraulischen Prozessen

Die in den Laborexperimenten zu erwartenden geohydraulischen Prozesse werden durch Siebanalysen des Probenmaterials, Videoanalyse der Materialbewegung und durch die Messung der vertikalen Verformungen an der Filteroberkante ermittelt und untersucht. Dabei werden folgende Ergebnisse als Grundlage für die hydraulische Bemessung von Kornfiltern unter welleninduzierten Strömungen erzielt:

- Bewertung der Erosions- und Transportprozesse anhand der Verformung des Filteraufbaus
- Klassifizierung der Filterstabilität mit stabilem, semi-stabilem und instabilem Zustand
- Ermittlung der kritischen hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze für den stabilen und semi-stabilen Zustand der einzelnen Filterkonfigurationen
- Beschreibung des dynamischen Verhaltens des Filteraufbaus im semi-stabilen und instabilen Zustand sowie die Änderungen der geotechnischen Eigenschaften des Filters (Abstandsverhältnis, Ungleichförmigkeit)

Die Bewegung des Basis- und Filtermaterials kann an den Rändern der Zelle beobachtet werden, es hat sich in der schichtweisen Beprobung eine sehr gleichmäßige Kornverteilung über den Fließquerschnitt in der Versuchszelle gezeigt. Aus diesem Grund spielen die Randeffekte in Bezug auf den Bewegungsbeginn und den Materialtransport des Basismaterials im Porenraum des Filters eine vernachlässigbare Rolle.

Die Lastaufbringung an der Oberkante des Filters ist in einem sehr begrenzten Bereich wirksam und nimmt durch die Wandreibung deutlich zur Schichtgrenze ab. Dies führt zu einer Reduzierung der wirkamen Auflast und der effektiven Spannung in der Bodenprobe, wodurch der Bewegungsbeginn an der Schichtgrenze gefördert wird. Der Einfluss der Filterauflast ist durch weitere Untersuchungen mit einer ungestörten Probe ohne den Einfluss einer seitlichen Begrenzung zu bewerten.

Die Bewertung der geohydraulischen und hydraulischen Prozesse bildet die Grundlagen für die hydraulische Bemessung von Kornfiltern. Mit dem Zusammenhang zwischen geometrischen Eigenschaften des Basis- und Filtermaterials und den kritischen hydraulischen Gradienten des Filtermaterials können Bemessungskriterien hergeleitet werden. In einem weiteren Schritt wird die Beschreibung des hydraulischen Gradienten in Abhängigkeit der Wellenparameter (Wellenhöhe H , Wellenperiode T in Wassertiefe h) und die Herleitung eines funktionalen Zusammenhangs erforderlich (siehe Abschnitt 6.1).

Die Porosität steht in einem engen Zusammenhang mit der Lagerungsdichte und der Ungleichförmigkeit. Die erforderlichen geometrischen Eigenschaften des Filters (Abstandsverhältnis, Ungleichförmigkeit, Porosität und Lagerungsdichte) können somit zur Erreichung der hydraulischen Filterstabilität in Abhängigkeit der Wellenparameter ermittelt werden.

6 Labordaten und numerische Untersuchungen zu geohydraulischen Prozessen im Filteraufbau

Die Ergebnisse der hydraulischen Laborexperimente und numerischen Untersuchungen zu den geohydraulischen Prozessen im Filteraufbau werden in diesem Kapitel zur Modellbildung und zur Herleitung von geometrischen und hydraulischen Bemessungskriterien im Kapitel 7 zusammengefasst, diskutiert und bewertet. Hierzu dienen die bodenmechanischen Prozesse (Kapitel 5) mit den kritischen hydraulischen Gradienten zum Bewegungsbeginn infolge Kontakterosion (Abschnitt 5.3) als Grundlage für die Bewertung der hydraulischen Prozesse. Die hydraulischen Prozesse werden im stabilen Zustand des Filters (ohne Materialumlagerung) betrachtet und den semi-stabilen und instabilen Zuständen gegenübergestellt.

Der Zusammenhang zwischen Wellenparametern und dem für die Bemessung maßgebenden hydraulischen Gradienten wird hierzu analysiert. Neben der Verbesserung des Prozessverständnisses der geohydraulischen Prozesse ist es das Hauptziel dieser Arbeit, hydraulische Stabilitätskriterien für Kornfilter unter der Einwirkung welleninduzierter Strömungen herzuleiten (siehe Abschnitt 2.4.2). Die durchgeführten Analysen sind dazu in Abbildung 6.1 zusammengefasst.

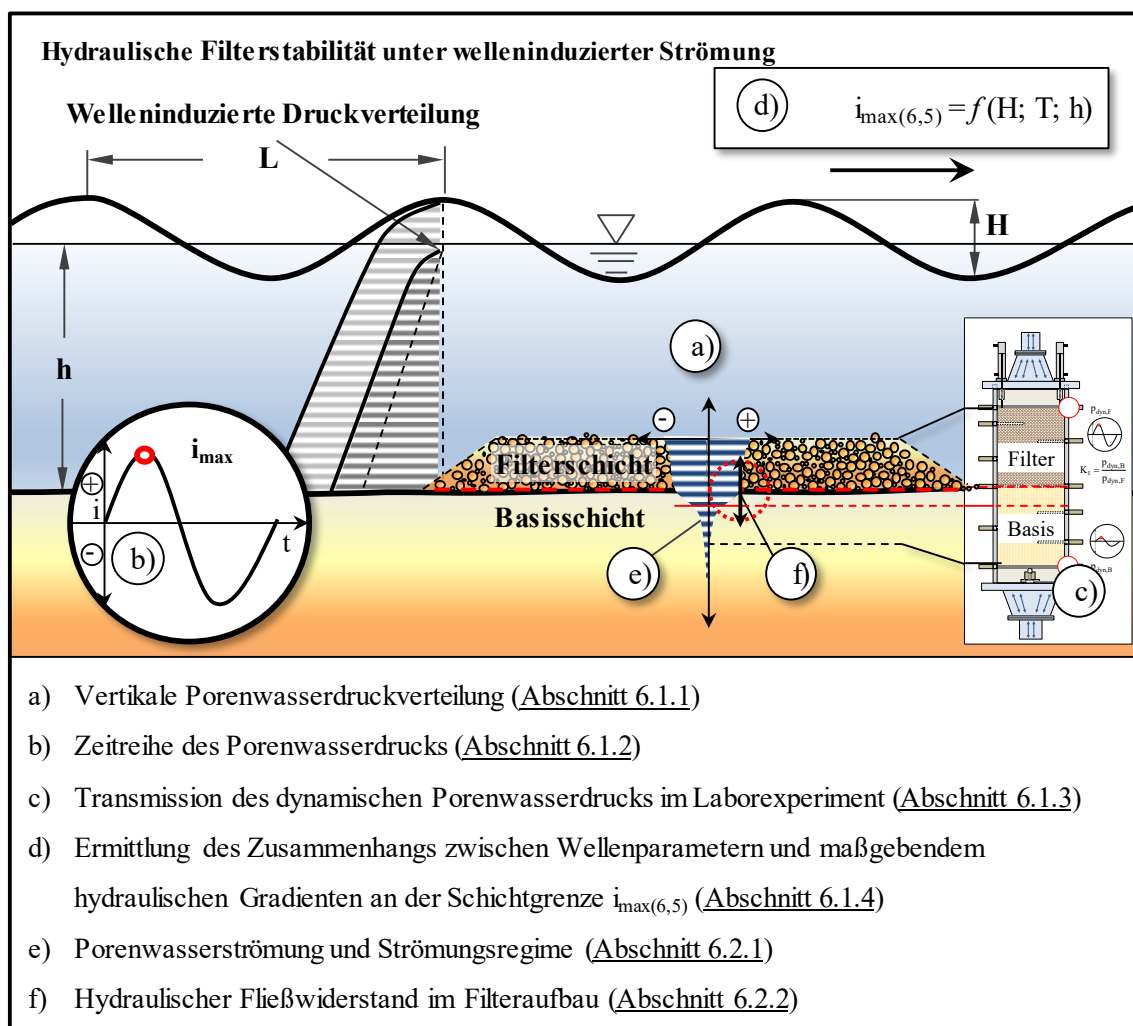


Abb. 6.1: Untersuchte geohydraulische Prozesse unter welleninduzierter Strömung in diesem Kapitel

In Abschnitt 6.1 wird die vertikale Porenwasserdruckverteilung sowie die daraus resultierenden hydraulischen Gradienten analysiert, um den maßgebenden (welleninduzierten) hydraulischen Gradienten für die hydraulische Filterbemessung zu ermitteln:

- Die vertikale Porenwasserdruckverteilung (Abschnitt 6.1.1, Abbildung 6.1 a)) und die Zeitreihe des Porenwasserdrucks werden zur Ermittlung des (für die Bemessung maßgebenden) maximalen hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial untersucht (Abschnitt 6.1.2, Abbildung 6.1 b))
- Der Einfluss der Randbedingungen im Laborexperiment auf den maximalen hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ wird im Zusammenhang mit der Transmission des dynamischen Porenwasserdrucks durch eine numerische Parameterstudie analysiert (Abschnitt 6.1.3, Abbildung 6.1 c))
- Der funktionale Zusammenhang zwischen Wellenparametern (Wellenhöhe H , Wellenperiode T , Wellenlänge L in Wassertiefe h) und dem hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ wird für die Filterbemessung hergeleitet (Abschnitt 6.1.4, Abbildung 6.1 d))

Die Analyse der Filtergeschwindigkeit v_f wird zusammen mit dem Widerstand der Porenwasserströmung in Abschnitt 6.2 beschrieben, um das Strömungsregime zu analysieren und die erforderlichen Widerstandskoeffizienten für die numerische Modellierung zu ermitteln:

- Die welleninduzierte Porenwasserströmung im Basis- und Filtermaterial wird zur Ermittlung der maßgebenden Filtergeschwindigkeit $v_{f,\max}$ und des vorherrschenden Strömungsregimes analysiert (Abschnitt 6.2.1, Abbildung 6.1 e))
- Der Zusammenhang zwischen hydraulischen Gradienten i im Basis- und Filtermaterial und der Filtergeschwindigkeit v_f wird zur Ermittlung des Fließwiderstands und der Darcy-Forchheimer Widerstandskoeffizienten des laminaren Terms (α) und des turbulenten Terms (β) für die Modellierung von Strömungen in Filteraufbauten mit weitgestuften Sand-Kies-Gemischen untersucht (Abschnitt 6.2.2, Abbildung 6.1 f))

Anschließend werden in Abschnitt 6.3 die wichtigsten Ergebnisse und die Bewertung der hydraulischen Prozesse in Hinblick auf die Entwicklung geometrischer und hydraulischer Stabilitätskriterien zusammengefasst.

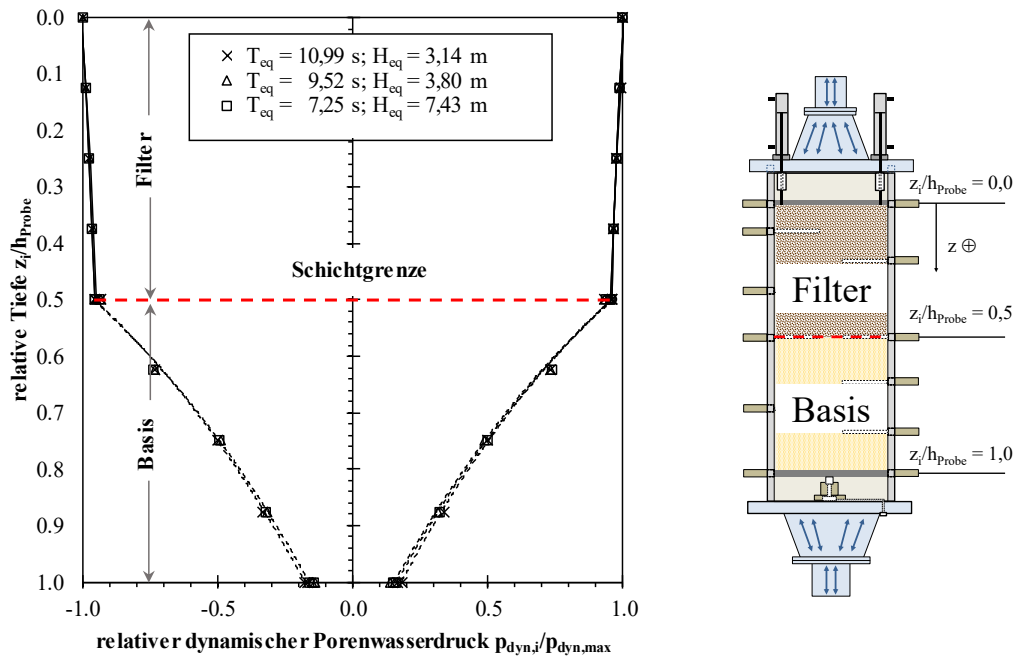
6.1 Porenwasserdruckverteilung und hydraulische Gradienten

Die hydraulische Stabilität des Kornfilters ist abhängig von der Porenwasserdruckverteilung und dem resultierenden hydraulischen Gradienten. Der hydraulische Gradient i führt beim Überschreiten des kritischen Zustands zu Erosionsprozessen und ist zwischen zwei Punkten als das Verhältnis der Druckhöhendifferenz Δh zu dem Sickerweg Δl definiert (Abschnitt 2.2.3). Zur Herstellung des Zusammenhangs zwischen der hydraulischen Einwirkung aus welleninduzierter Strömung und Stabilität des Filters gegen Kontakterosion wird der hydraulische Gradient aus der Porenwasserdruckverteilung innerhalb des Filter- und Basismaterials ermittelt. Zur Herleitung von Stabilitätskriterien zur hydraulischen Filterbemessung werden die Laborexperimente zu folgenden Prozessen analysiert:

- (i) Vertikale Verteilung des Porenwasserdrucks innerhalb der Basis- und Filterschicht zur Lokation des Maximums zum Zeitpunkt des Wellenbergs und Wellentals (Abschnitt 6.1.1).
- (ii) Maximalwerte der hydraulischen Gradienten in verschiedenen Schichten des Basis- und Filtermaterials werden durch Zeitreihenanalyse in Hinblick auf die maßgebende Einwirkung des Bewegungsbeginns durch Kontakterosion untersucht und diskutiert (Abschnitt 6.1.2).
- (iii) Die Dissipation beziehungsweise die „Transmission“ des dynamischen Porenwasserdrucks werden zur Ermittlung der Randeinflüsse im Laborexperiment und zur Definition der Randbedingungen im numerischen Modell analysiert und diskutiert (Abschnitt 6.1.3).
- (iv) Die räumliche und zeitliche Porenwasserdruckentwicklung werden analysiert, um den maßgebenden hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial für die Bemessung der Filterstabilität zu ermitteln. Hierzu wird abschließend der hydraulische Gradient in Abhängigkeit der äquivalenten Wellenparameter dargestellt (Abschnitt 6.1.4).

6.1.1 Vertikale Porenwasserdruckverteilung im Laborexperiment

In vertikalen Abständen von jeweils 10 cm wird der Druck von der Filteroberkante ($z_i/h_{\text{probe}} = 0,0$) bis zur Unterkante des Basismaterials ($z_i/h_{\text{probe}} = 1,0$) erfasst (siehe Abschnitt 3.1.2). Es wird die Verteilung des dynamischen Drucks $p_{\text{dyn},i}$ im Verhältnis zum Maximum des dynamischen Drucks $p_{\text{dyn,max}}$ jeweils zum Zeitpunkt des Wellenbergs und des Wellentals (äquivalent zu Wellen mit freier Wasseroberfläche) über die relative Tiefe z_i/h_{probe} analysiert, um die maßgebende hydraulische Einwirkung der Kontakterosion zu ermitteln (Abbildung 6.2).

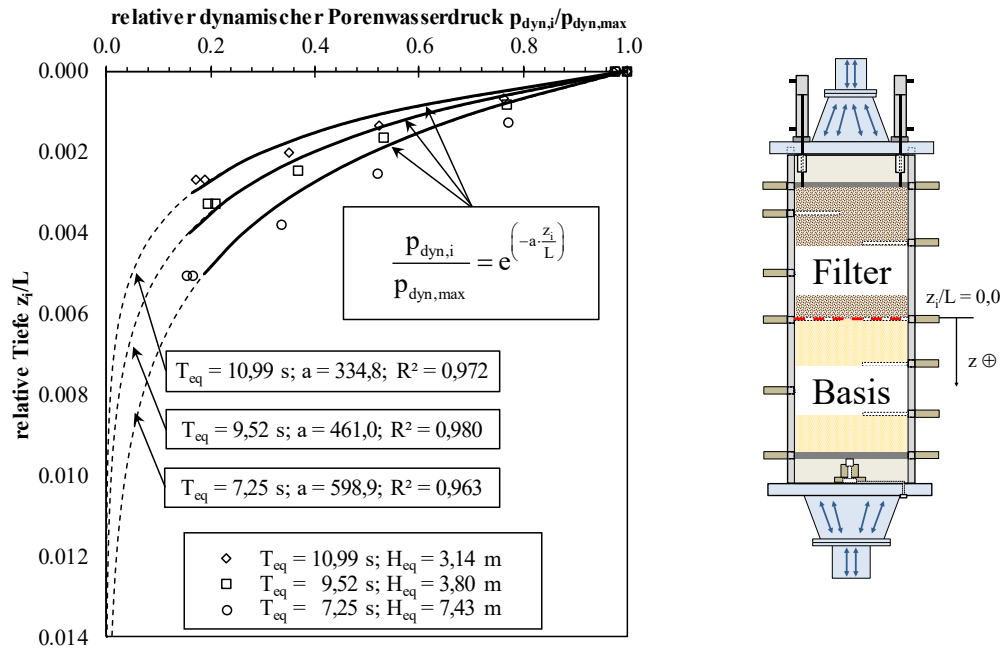


a) Vertikale Porenwasserdruckverteilung im Basis- und Filtermaterial (Filter F2A2; $h_{eq} = 25,80$ m)

b) Systemskizze der Versuchszelle

Abb. 6.2: Vertikale Verteilung des relativen dynamischen Porenwasserdrucks $p_{dyn,i}/p_{dyn,max}$ innerhalb der Basis- und Filterschicht im Labor

In Abbildung 6.2 a) ist die vertikale Verteilung des dynamischen Porenwasserdrucks im Verhältnis zum maximalen dynamischen Porenwasserdruck über die relative Tiefe z_i/h_{Probe} (Abbildung 6.2 b)) dargestellt. Während der dynamische Druck $p_{dyn,i}/p_{dyn,max}$ im Filter bis zur Schichtgrenze um 4 % abnimmt, ergibt sich die größte Änderung unterhalb der Schichtgrenze. Innerhalb des Basismaterials nimmt der dynamische Druck bis zur unteren Randbedingung auf 10 % bis 20 % des maximalen dynamischen Drucks $p_{dyn,max}$ deutlich ab. Zur weiteren Analyse der Porenwasserdruckverteilung im Basismaterial ist es sinnvoll, den relativen Porenwasserdruck im Einfluss der Wellenlänge L mit der relativen Tiefe z_i/L zu untersuchen. Hierzu ist in Abbildung 6.3 die vertikale Verteilung des relativen dynamischen Porenwasserdrucks $p_{dyn,i}/p_{dyn,max}$ im Basismaterial über die relative Tiefe z_i/L dargestellt.



a) Vertikale Porenwasserdruckverteilung im Basismaterial (Filter F2A2, $h_{eq} = 25,8$ m) b) Systemskizze der Versuchszelle

Abb. 6.3: Vertikale Verteilung des relativen dynamischen Porenwasserdrucks $p_{dyn}/p_{dyn,max}$ im Basismaterial über die relative Tiefe z_i/L (Labordaten)

Die vertikale Porenwasserdruckverteilung ist in Abbildung 6.3 a) im Basismaterial unterhalb der Schichtgrenze über die relative Tiefe z_i/L (Abbildung 6.3 b)) dargestellt. Hierbei zeigt sich im Vergleich der drei Wellenperioden $T_{eq} = 7,25$ s; $9,52$ s und $10,99$ s der Einfluss der Wellenperiode T auf den relativen dynamischen Porenwasserdruck. Die Porenwasserdruckverteilung kann mit dem relativen Porenwasserdruck $p_{dyn,i}/p_{dyn,max}$ unter dem Einfluss des Exponenten der Druckabnahme a und der relativen Tiefe z_i/L nach folgender Gleichung beschrieben werden:

$$\frac{p_{dyn,i}}{p_{dyn,max}} = e^{\left(-a \cdot \frac{z_i}{L}\right)} \quad (6.1)$$

mit:

- p_{dyn} : dynamischen Porenwasserdruck in bar
- $p_{dyn,max}$: maximaler dynamischer Porenwasserdruck (an der Filteroberkante) in bar
- z_i : Tiefe im Boden ($z = 0$ an der Schichtgrenze) in m
- L : Lokale Wellenlänge in m
- a : Exponent der Druckabnahme

Die Parameter der Druckverteilung aus Gleichung 6.1 sind in Tabelle 6.1 für die untersuchten hydraulischen Parameter (Wellenperiode T_{eq} und Wellenhöhe H_{eq}) dargestellt.

Tab. 6.1: Parameter der Druckverteilung nach Gleichung 6.1 (Filter F2A2, $h_{eq} = 25,8$ m)

Wellenperiode	Wellenhöhe	Exponent der Druckabnahme	Bestimmtheitsmaß
T_{eq}	H_{eq}	a	R^2
s	m	-	-
7,25	7,43	598,9	0,963
9,52	3,80	461,0	0,980
10,99	3,14	334,8	0,972

Der Exponent a ist abhängig von den hydraulischen Parametern (Wellenhöhe H_{eq} , Wellenperiode T_{eq}) und von den Eigenschaften des Basis- und Filtermaterials (Durchlässigkeit, Sättigungsgrad, Bodenspannungen). Die Untersuchungen zu plötzlichen Wasserstandsänderungen in Böschungssicherungen nach Köhler (1989) und Köhler (2003) und zu welleninduzierten Druckänderungen in Meeressohlen nach Groot et al. (2006) zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf des Porenwasserdrucks über die Tiefe auf der Basis einer natürlichen Exponentialfunktion. Zur Definition der unteren Druckrandbedingung (unterhalb der Basisschicht) mit einem konstanten hydrostatischen Druck (ohne dynamischen Druckanteil) ist für die numerische Modellierung die Kenntnis über die Mindesttiefe in der Basisschicht erforderlich. Die erforderliche Tiefe z_i , in der 1 % des maximalen dynamischen Drucks $p_{dyn,max}$ erreicht wird, kann durch Umstellen der Gleichung 6.1 wie folgt ermittelt werden:

$$z_i = \frac{\ln(0,01)}{-a} \cdot L \quad (6.2)$$

Bei der maximalen Wellenbelastung mit einem Brechindex $H/h = 0,78$ und einer Wellensteilheit $H/L = 0,142$ in einer Wassertiefe von $h_{eq} = 25,8$ m (Wellenhöhe $H_{eq} = 20,12$ m; Wellenperiode $T_{eq} = 10,55$ s;) ergibt sich die erforderliche Tiefe z_i , in der 1 % des maximalen dynamischen Drucks $p_{dyn,max}$ erreicht wird, zu: $z_i = 1,95$ m (mit $a = 334,8$ nach Tabelle 6.1; $L = 141,69$ m). Zur numerischen Modellierung ist daher eine Schichtdicke des Basismaterials $SD_B \geq 1,95$ m erforderlich, um einen relativen dynamischen Druck $p_{dyn,i}/p_{dyn,max} \leq 1$ % zu erreichen. Mit zunehmender Wellenperiode T und Wellenlänge L nimmt die Tiefe z_i bei gleichem relativen dynamischen Druck $p_{dyn,i}/p_{dyn,max}$ zu.

Aus der Analyse der Porenwasserdruckverteilung resultieren folgende Erkenntnisse:

- Der für die Filterstabilität maßgebende hydraulische Gradient entsteht unterhalb der Schichtgrenze in einem sehr kleinen Bereich Δl und wird durch die Drucksensoren an der Schichtgrenze und 10 cm unterhalb der Schichtgrenze erfasst.
- Die Schichtdicke des Basismaterials ($SD_B = 0,40$ m) führt zu einer Dämpfung des dynamischen Porenwasserdrucks auf 10 % bis 20 % des maximalen Drucks am unteren Rand der Basisschicht ($z_i/h_{Probe} = 1,0$). Der relative dynamische Porenwasserdruck $p_{dyn,i}/p_{dyn,max}$ am unteren Rand wird durch die Durchlässigkeit des Basis- und Filtermaterials, sowie durch die hydraulische Einwirkung beeinflusst. Eine größere Schichtdicke ist erforderlich um einen nahezu vollständigen Abbau des dynamischen Porenwasserdrucks am unteren Rand der Basisschicht zu erreichen.

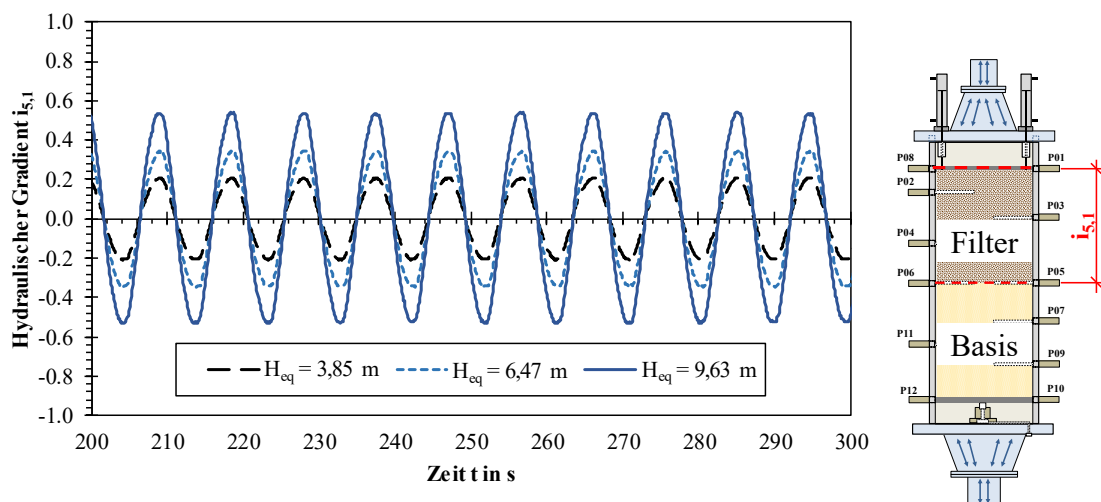
- Die numerische Modellierung der Porenwasserdruckverteilung im Basismaterial unterhalb des Filters erfordert nach Gleichung 6.2 eine Mindestdicke des Basismaterials von $SD_B \geq 1,95$ m, um einen annähernd konstanten hydrostatischen Druck mit $(p_{dyn,i}/p_{dyn,max} \leq 1 \%)$ am unteren Rand der Basisschicht zu erreichen.

Aus der Porenwasserdruckverteilung wird das Maximum des hydraulischen Gradienten unterhalb der Schichtgrenze zwischen Filter- und Basisschicht direkt unterhalb der Schichtgrenze in einem sehr kleinen Bereich Δl ermittelt. Zur Bemessung der hydraulischen Filterstabilität ist der maximale hydraulische Gradient unterhalb der Schichtgrenze der maßgebende Parameter. Durch die Drucksensoren wird dieser hydraulische Gradient $i_{6,5}$ im Bereich zwischen der Schichtgrenze (Level 5) und 10 cm unterhalb der Schichtgrenze (Level 6) erfasst. Die Zeitreihenanalyse des hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ gibt weiteren Aufschluss über die Maximalwerte in den Schichten des Basis- und Filtermaterials (Abschnitt 6.1.2).

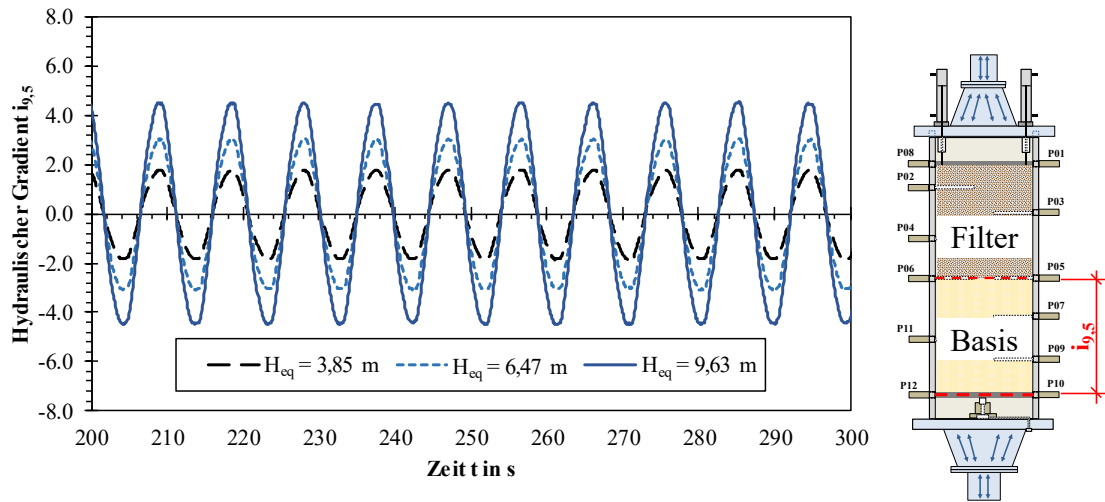
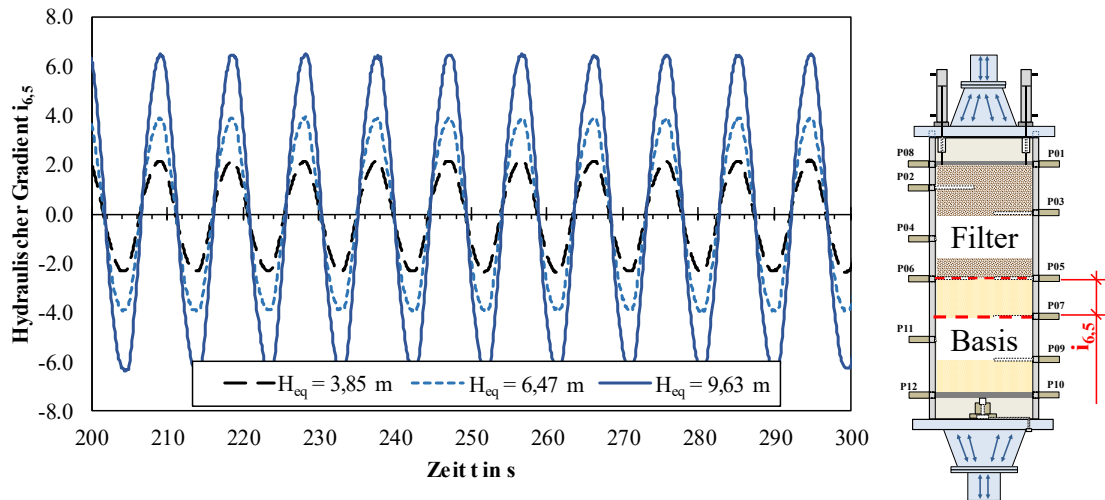
Zur Untersuchung des Einflusses der unteren Randbedingung in den Laborexperimenten auf die Porenwasserdruckverteilung und den resultierenden hydraulischen Gradienten ist es erforderlich eine numerische Parameterstudie zur Schichtdicke des Basismaterials durchzuführen (Abschnitt 6.1.3).

6.1.2 Zeitreihe des hydraulischen Gradienten im Basis- und Filtermaterial

Der hydraulische Gradient wird durch regelmäßige sinusförmige Druckverläufe in der Wechseldurchströmungsanlage erzeugt. In Abbildung 6.4 sind die Zeitreihen des hydraulischen Gradienten $i_{5,1}$ zwischen Filteroberkante und Schichtgrenze (Abbildung 6.4 a), zwischen der Schichtgrenze und dem unteren Rand der Basisschicht $i_{9,5}$ (Abbildung 6.4 b)) und zwischen Schichtgrenze und 10 cm unterhalb $i_{6,5}$ (Abbildung 6.4 c)) für verschiedene äquivalente Wellenhöhen H_{eq} sowie gleicher äquivalenter Wellenperiode $T_{eq} = 9,52$ s in gleicher äquivalenter Wassertiefe $h_{eq} = 25,81$ m dargestellt. Zur besseren Darstellung sind die hydraulischen Gradienten unterschiedlich skaliert ($i_{5,1}: \pm 1$; $i_{9,5}: \pm 8$; $i_{6,5}: \pm 8$).



a) Hydraulischer Gradient $i_{5,1}$ in der Filterschicht (skaliert auf $i_{5,1} = \pm 1$)

b) Hydraulischer Gradient $i_{9,5}$ in der Basisschichtc) Hydraulischer Gradient $i_{6,5}$ an der Schichtgrenze zwischen Basis- und FilterschichtAbb. 6.4: Zeitreihen der hydraulischen Gradienten in der Basisschicht und Filterschicht für verschiedene Wellenhöhen H_{eq} (Filter F1C1; $T_{eq} = 9,52$ s; $h_{eq} = 25,81$ m)

Der Vergleich der Zeitreihen in Abbildung 6.4 a) und b) zeigt, dass der hydraulische Gradient in der Filterschicht $i_{5,1}$ um etwa eine Zehnerpotenz geringer als der hydraulische Gradient im Basismaterial $i_{9,5}$ auftritt ($i_{9,5} \approx 10 \cdot i_{5,1}$). Der größte hydraulische Gradient $i_{6,5}$ entsteht zwischen der Schichtgrenze und 10 cm unterhalb in der Basisschicht (Abbildung 6.4 c)).

6.1.3 Transmission und Dissipation des dynamischen Drucks im Basis- und Filtermaterial

Die Transmission des dynamischen Drucks im Basis- und Filtermaterial beeinflusst den hydraulischen Gradienten und damit die Stabilität des Kornfilters. Der „Transmissionskoeffizient“ ist als Verhältnis des dynamischen Drucks oberhalb der Filterschicht $p_{dyn,F}$ und unterhalb der Basisschicht $p_{dyn,B}$ definiert: $K_t = p_{dyn,B}/p_{dyn,F}$. Der Transmissionskoeffizient entspricht $K_t = 0$, wenn der dynamische Druckanteil im Basismaterial $p_{dyn,B} = 0$ ist und $K_t = 1$, wenn der dynamische Druckanteil zu $d_{dyn,B} = d_{dyn,F}$ wird.

Im Laborexperiment ist die untere Randbedingung abhängig von der oberen Randbedingung und der Druckdämpfung in der Basis- und Filterschicht, in diesem Zusammenhang werden in diesem Abschnitt folgende Einflüsse des Transmissionskoeffizienten K_t betrachtet:

- Einfluss der Wellenhöhe H_{eq}
- Einfluss der Wellenperiode T_{eq}
- Modelleffekt der Wechseldurchströmungsanlage
- Sensitivität des hydraulischen Gradienten durch Variation des Transmissionskoeffizienten K_t
- Phasenverschiebung Δt
- Dicke der Basisschicht SD_B

Wellenhöhe H_{eq} : Der Einfluss der äquivalenten Wellenhöhe H_{eq} auf den Transmissionskoeffizienten K_t aus den Laborexperimenten mit der Wechseldurchströmungsanlage in Abbildung 6.5 dargestellt.

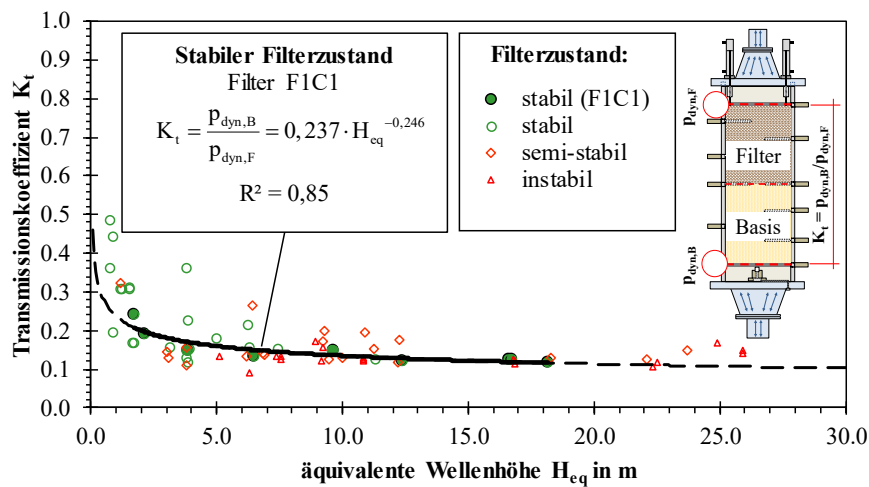


Abb. 6.5: Transmissionskoeffizient K_t in Abhängigkeit der äquivalenten Wellenhöhe H_{eq} (stabiler Filterzustand der Filterkonfiguration F1C1 ohne Materialumlagerungen, $T_{eq} = 7,25$ s; $9,52$ s; $10,99$ s; $12,50$ s)

Mit zunehmender Wellenhöhe nimmt der Transmissionskoeffizient K_t durch die zunehmende Energie-dissipation durch Turbulenz der Porenwasserströmung ab und nähert sich mit steigender Wellenhöhe H_{eq} dem Wert $K_t \approx 0,1$ (Abbildung 6.5). Die Daten weisen eine große Streuung auf und es besteht der beste Zusammenhang ($R^2 = 0,85$) zwischen der Wellenhöhe H_{eq} und dem Transmissionskoeffizienten K_t im stabilen Zustand der Filterkonfiguration F1C1 (ohne Materialbewegung). Durch den Transmissionskoeffizienten K_t können die Randbedingungen in einem numerischen Modell definiert werden. Der Druck der unteren Randbedingung $p_{dyn,B}$ kann mit dem Transmissionskoeffizienten K_t in Abhängigkeit des Drucks der oberen Randbedingung $p_{dyn,F}$ wie folgt ermittelt werden:

$$p_{dyn,B} = K_t \cdot p_{dyn,F} \quad (6.3)$$

mit:

- K_t : Transmissionskoeffizient des dynamischen Druckanteils
 $p_{dyn,B}$: Dynamischer Druck unterhalb der Basisschicht in bar
 $p_{dyn,F}$: Dynamischer Druck oberhalb der Filterschicht in bar

Der Transmissionskoeffizient K_t ergibt sich in Abhängigkeit der äquivalenten Wellenhöhe H_{eq} für die Filterkonfiguration F1C1 ($d_{15F}/d_{85B} = 2,3$; $d_{60F}/d_{10F} = 2,3$) zu:

$$K_t = \frac{p_{\text{dyn,B}}}{p_{\text{dyn,F}}} = 0,237 \cdot H_{\text{eq}}^{-0,246} \quad (6.4)$$

Der funktionale Zusammenhang aus Gleichung 6.4 erreicht innerhalb des untersuchten Bereichs ein relativ geringes Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,85$ und führt bei abweichenden hydraulischen und geotechnischen Randbedingungen zu sehr großen Unsicherheiten.

Wellenperiode T_{eq} : Die Streuung der Daten (in Abbildung 6.5) entsteht auch durch den Einfluss der äquivalenten Wellenperiode T_{eq} (bzw. Wellenlänge L_{eq}) und der äquivalenten Wassertiefe h_{eq} . Der Einfluss der Wellenperiode T_{eq} auf den Transmissionskoeffizienten K_t ist im Vergleich zum Einfluss der Anlagensteuerung relativ gering. Aufgrund der geringen Variation der Wellenperiode (mit $T_{\text{eq}} = 7,25$ s bis $12,50$ s) in den Laborexperimenten, sind weitere Untersuchungen zur Beschreibung des funktionalen Zusammenhangs erforderlich. Die Untersuchung des Einflusses der Wellenperiode T_{eq} auf den hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ erfordert die Unterstützung durch numerische Untersuchungen (siehe Abschnitt 7.1.1).

Modelleffekt der Wechseldurchströmungsanlage: Der dargestellte funktionale Zusammenhang wird durch die Steuerung der Versuchsanlage beeinflusst, da die untere Randbedingung auf den Sollwert $p_{\text{dyn,B}} = 0$ geregelt wird. Dieser Sollwert wird in Abhängigkeit der äquivalenten Durchlässigkeit der Probe (unter dem Einfluss des Sättigungsgrads, der Porosität und der effektiven Spannung) entsprechend gut angenähert. Bei geringer äquivalenter Durchlässigkeit des Basis- und Filtermaterials sowie großer äquivalenter Wellenhöhe H_{eq} stellt sich eine große Dissipation des dynamischen Porenwasserdrucks ein und der Transmissionskoeffizient nimmt ab. Weiterhin besteht ein Einfluss der Wellenperiode auf die Anlagensteuerung. Lange Wellenperioden T_{eq} können im Vergleich zu kurzen Wellenperioden mit höherer Genauigkeit geregelt werden, da der Einfluss der Verzögerung in der Druckregelung abnimmt.

Transmissionskoeffizienten K_t : Bei der Anwendung des Transmissionskoeffizienten K_t zur Ermittlung der Randbedingung im numerischen Modell ist zu beachten, dass die hydraulischen Gradienten im Filter- und Basismaterial unmittelbar durch den Transmissionskoeffizient K_t beeinflusst werden. Zur Ermittlung des maßgebenden hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze $i_{6,5}$ wird der Zusammenhang zwischen hydraulischem Gradienten $i_{6,5}$ und Transmissionskoeffizienten K_t untersucht. Aufgrund der Einflüsse durch die Steuerung der Versuchsanlage, wird die Sensitivität des hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze durch die untere Randbedingung in den Laborexperimenten mit numerischen Simulationen untersucht. In Abbildung 6.6 ist der Einfluss des Transmissionskoeffizienten K_t auf den hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ aus numerischer Untersuchung dargestellt.

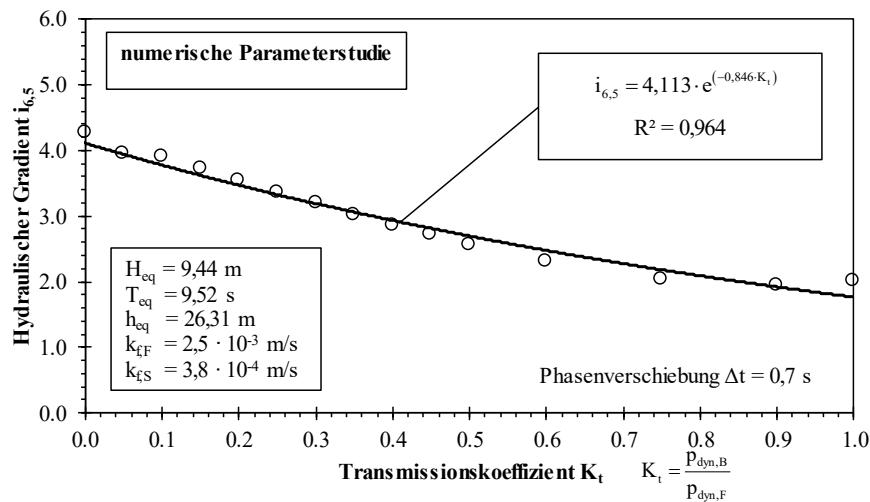


Abb. 6.6: Einfluss des Transmissionskoeffizienten K_t auf den hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ an der Schichtgrenze (numerische Simulation mit der Phasenverschiebung $\Delta t = 0,7$ ermittelt aus Laborexperimenten mit Filterkonfiguration F1C1, siehe auch Abschnitt 4.5.2)

Der Einfluss des Transmissionskoeffizienten K_t (beziehungsweise der Dämpfung des dynamischen Drucks) auf den hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ an der Schichtgrenze zeigt sich in den Ergebnissen aus den Abbildungen 6.5 und 6.6. Bei einer Zunahme des Transmissionskoeffizienten um 100 % von $K_t = 0,1$ auf $0,2$ stellt sich eine Abnahme des hydraulischen Gradienten von $i_{6,5} = 3,87$ auf $3,54$ ein. Das entspricht in dem gezeigten Beispiel einer Abnahme des hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ um 8,5 %. Im Fall einer undurchlässigen Sohle an der Unterseite der Basisschicht strebt der Transmissionskoeffizient $K_t \rightarrow 0$ und damit stellt sich der maximale hydraulische Gradient $i_{6,5}$ bei gleicher oberer Randbedingung ein. Dabei steigt der hydraulische Gradient von $i_{6,5} = 3,87$ auf $4,21$ um 8,8 % an.

Zusammenfassend führt die Wahl des Transmissionskoeffizienten $K_t = 0$ (mit einer Dicke der Basisschicht $SD_B = 0,40 \text{ m}$) in Laborexperimenten und in der numerischen Modellierung zu unrealistischen Ergebnissen gegenüber der natürlichen Dämpfung des dynamischen Porenwasserdrucks in einer unbegrenzten Basisschicht. Zur Modellbildung der hydraulischen Filterstabilität bekommt damit die untere Randbedingung eine sehr große Bedeutung. Die Sensitivitätsuntersuchung der Laborexperimente (Abbildung 6.5) und der numerischen Experimente (Abbildung 6.6) zeigen den großen Einfluss der unteren Randbedingung auf den maßgebenden hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze. Zur Optimierung der numerischen Modellierung wird der Einfluss des Abstands der unteren Randbedingung zur Schichtgrenze SD_B auf den hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ bei konstantem hydrostatischen Druck ($K_t = 0$) in einer Parameterstudie untersucht. Weiterhin bedarf es der Analyse der Phasenverschiebung Δt zwischen der oberen und unteren Randbedingung bei konstantem Transmissionskoeffizienten K_t .

Phasenverschiebung Δt : Mit Hilfe weiterer Sensitivitätsanalysen wird die Transmission des dynamischen Drucks in Abhängigkeit der Phasenverschiebung Δt zwischen der oberen und unteren Randbedingung des dynamischen Drucks beschrieben. In Abbildung 6.7 ist der hydraulische Gradient $i_{6,5}$ in Abhängigkeit des Verhältnisses der Phasenverschiebung Δt zur äquivalenten Wellenperiode T_{eq} als Ergebnis der numerischen Untersuchungen dargestellt.

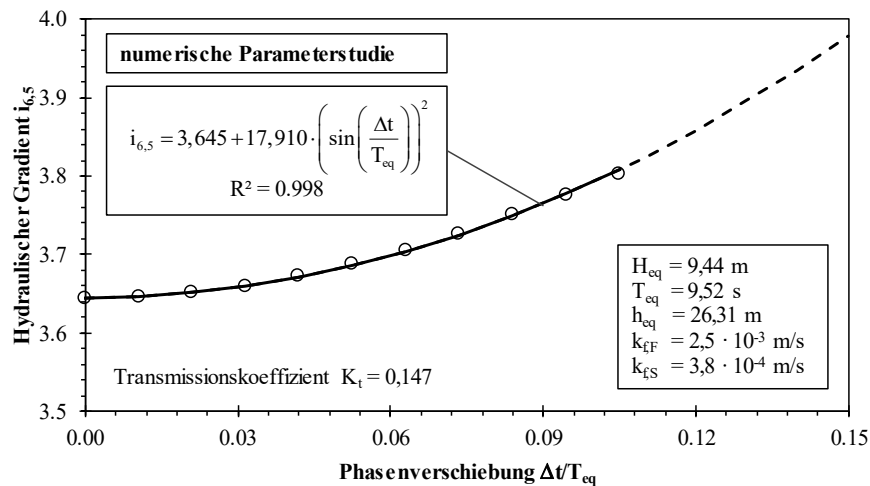


Abb. 6.7: Einfluss der Phasenverschiebung $\Delta t/T_{eq}$ auf den hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ an der Schichtgrenze (numerische Simulation mit $K_t = 0,147$ ermittelt aus Laborexperimenten mit F1C1 für $H_{eq} = 9,44 \text{ m}$, siehe Abbildung 6.5)

Mit zunehmender Phasenverschiebung $\Delta t/T_{eq}$ nimmt der hydraulische Gradient an der Schichtgrenze $i_{6,5}$ zu. Wird die Phasenverschiebung zu $\Delta t/T_{eq} = 0$ so erreicht der hydraulische Gradient das Minimum und wird die Phasenverschiebung zu $\Delta t/T_{eq} = T_{eq}/2$ erreicht $i_{6,5}$ das Maximum. In den Laborversuchen wurden Phasenverschiebungen zwischen der oberen ($p_{dyn,F}$) und unteren Randbedingung ($p_{dyn,B}$) im Bereich von $\Delta t = 0,1 \text{ s}$ bis $0,3 \text{ s}$ erfasst. In Bezug auf die äquivalente Wellenperiode $T_{eq} = 9,52 \text{ s}$ ergibt sich hieraus ein Bereich von $\Delta t/T_{eq} = 0,01$ bis $0,03$. Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse in Abbildung 6.7 zeigt für eine Zunahme der Phasenverschiebung von $\Delta t = 0,1 \text{ s}$ bis $0,3 \text{ s}$ eine Zunahme des hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ um $0,4 \%$. Damit ist die Phasenverschiebung zwischen der oberen und unteren Druckrandbedingung in Bezug auf den hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze $i_{6,5}$ für die durchgeführten Laborversuche vernachlässigbar gering.

Dicke der Basisschicht: Zur weiteren Analyse des Einflusses der Randbedingungen im Laborexperiment wird durch numerische Simulationen die Schichtdicke des Basismaterials beziehungsweise der Abstand der unteren Randbedingung zur Schichtgrenze untersucht. In Abbildung 6.8 ist der Einfluss des Abstands der unteren Randbedingung zur Schichtgrenze SD_B auf den maximalen hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze $i_{\max(6,5)}$ dargestellt. Die untere Randbedingung ist so gewählt, dass der dynamische Porenwasserdruck $p_{dyn,B}$ vollständig im Basismaterial abgebaut wird (Phasenverschiebung $\Delta t = 0 \text{ s}$ und $K_t = 0$).

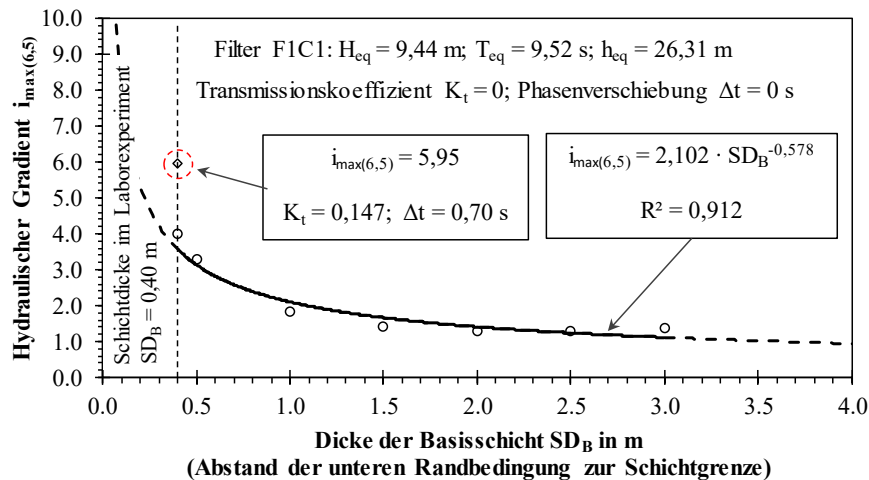


Abb. 6.8: Einfluss des Abstands zur unteren Randbedingung bzw. der Dicke der Basisschicht SD_B auf den hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ (numerische Simulation mit $K_t = 0$ und $\Delta t = 0$ s)

Der hydraulische Gradient $i_{6,5}$ wird durch den Abstand zwischen Schichtgrenze und dem Punkt, an dem keine dynamische Druckänderung vorherrscht, beeinflusst. In der Sensitivitätsanalyse zeigt sich eine starke Abnahme des hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ mit größerem Abstand zu der unter Randbedingung (mit einem Transmissionskoeffizienten von $K_t = 0$). So nimmt das Maximum des hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ bei einer Steigerung der Schichtdicke des Basismaterials von $S_B = 0,4$ m auf 1,0 m von $i_{\max(6,5)} = 3,5$ bar auf 1,8 bar um rund 49 % ab (Abbildung 6.8). Der Transmissionskoeffizient K_t hat im untersuchten Bereich ($K_t = 0,147$) einen relativ großen Einfluss auf den hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$. Der hydraulische Gradient $i_{6,5}$ nimmt bei einer Änderung des Transmissionskoeffizienten von $K_t = 0$ auf 0,147 um 13 % ab. Ab einer Schichtdicke von $SD_B \geq 2,0$ m ergeben sich sehr geringe Änderungen des hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$. Aus der Analyse des Einflusses der Schichtdicke des Basismaterials lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

- Der Einfluss der unteren Randbedingung auf den hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze $i_{\max(6,5)}$ ist durch die Phasenverschiebung und Amplitude des geregelten dynamischen Drucks an der unteren Randbedingung im Vergleich zu einer unbegrenzten Porenwasserdruckverteilung im Basismaterial sehr groß. Der hydraulische Gradienten $i_{\max(6,5)}$ an der Schichtgrenze zwischen dem Laborexperiment mit einer Schichtdicke von $SD_B = 0,40$ m unterliegt im Vergleich zu der numerischen Modellierung mit einer Schichtdicke von $SD_B = 3,00$ m einer relativen Abweichung von $\Delta x = 76$ % (nach Gleichung 4.7).
- Die weiteren numerischen Untersuchungen werden mit einer Schichtdicke von $SD_B > 0,40$ m durchgeführt, um einen möglichst geringen Einfluss der unteren Randbedingung auf den hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze zu erhalten. Zur Machbarkeit der numerischen Parameterstudie erweist sich unter Berücksichtigung der erforderlichen Genauigkeit (siehe Abschnitt 6.1.1) und der Rechenzeit eine Schichtdicke von $SD_B = 3,00$ m als zweckmäßig.

Die Dämpfung des dynamischen Wellendrucks in der Filterschicht und im Meeresgrund bestimmen die hydraulische Belastung an der Schichtgrenze zwischen Basis und Filter. Dabei ist die Dämpfung beziehungsweise die Transmission des dynamischen Drucks abhängig von der Durchlässigkeit, dem Sättigungsgrad und von dem Grad der Turbulenz. Die Sensitivität der Randbedingungen des hydraulischen Modellversuchs wurde durch numerische Modellierung mit einer vergleichenden Parameterstudie untersucht.

Modelleffekt: Es zeigt sich ein relativ großer Einfluss des Transmissionskoeffizienten K_t und ein sehr geringer Einfluss der Phasenverschiebung Δt des dynamischen Drucks zwischen der oberen und unteren Randbedingung auf den hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial. Die Steuerung der Randbedingung unterhalb der 40 cm dicken Basisschicht führt in der Wechselfeld durchströmungsanlage zu Abweichungen im Vergleich zur Druckdämpfung in einer unbegrenzten Basisschicht. Im Laborexperiment werden daher zu hohe hydraulische Gradienten an der Schichtgrenze erzeugt, wodurch die hydraulische Filterstabilität deutlich unterschätzt wird. Die hydraulischen Laborversuche eignen sich nicht zur Herleitung des Zusammenhangs zwischen Wellenparametern und dem hydraulischen Gradienten in Bezug auf eine natürliche Druckdämpfung in einem unbegrenzten Meeresgrund (Basisschicht). Die Laborversuche liefern jedoch wichtige Ergebnisse zur Kalibrierung und Validierung des numerischen Modells, zur Verbesserung des Prozessverständnisses der geohydraulischen Prozesse und sind notwendig zur Ermittlung der kritischen hydraulischen Gradienten.

Definition der Randbedingung zur numerischen Modellierung: Zur Herleitung von Bemessungskriterien für die hydraulische Bemessung von Kornfiltern wird der Zusammenhang zwischen Wellenparametern und dem maßgebenden hydraulischen Gradienten an Schichtgrenze durch numerische Modellierung hergestellt. Zu diesem Zweck wird die untere Randbedingung (unterhalb der Basisschicht) mit dem konstanten hydrostatischen Porenwasserdruck definiert ($p_{\text{dyn,B}} = 0$) und die Schichtdicke des Basismaterials SD_B wird so gewählt, dass die Transmissionskoeffizienten K_t und die Phasenverschiebung Δt , wie sie im Laborexperiment auftreten, im numerischen Modell entfallen. Aus der Sensitivitätsanalyse (Abbildung 6.8) und der Analyse der Druckverteilung im Laborexperiment (Abschnitt 6.1.1) resultiert eine erforderliche Schichtdicke der Basisschicht SD_B (beziehungsweise der Abstand der unteren Randbedingung zur Schichtgrenze) von $SD_B \geq 2,0$ m. In Hinblick auf die erforderliche Rechenzeit zur Durchführung der numerischen Parameterstudie wird die Schichtdicke im numerischen Modell mit $SD_B = 3,0$ m gewählt.

6.1.4 Hydraulischer Gradient an der Schichtgrenze Basis-/Filtermaterial

Neben dem Widerstand des Kornfilters gegenüber der Kontakterosion ist die Kenntnis über die welleninduzierte Einwirkung erforderlich, um zuverlässige hydraulische Stabilitätskriterien herleiten zu können. Es ist das Ziel den maßgebenden welleninduzierten hydraulischen Gradienten im funktionalen Zusammenhang mit den maßgebenden Wellenparametern (Wellenhöhe H , Wellenperiode T und Wassertiefe h) unter Berücksichtigung des Stabilitätszustands (stabil, semi-stabil, instabil), sowie der geotechnischen Eigenschaften des Filtermaterials (Durchlässigkeit $k_{f,F}$, Filterauflast p_A) zu beschreiben.

Die hydraulische Stabilität von Kornfiltern ist vom hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ an der Schichtgrenze zwischen Basis und Filter (Level 5) und 10 cm unterhalb der Schichtgrenze (Level 6) abhängig (Abschnitt 3.3.2). Die Analyse der Laborexperimente ermöglicht einen Zusammenhang zwischen dem maximalen hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze $i_{\text{max}(6,5)}$ und den maßgebenden Wellenparametern (Wellenhöhe H , Wellenperiode T und Wassertiefe h) herzustellen. Dazu werden in diesem Abschnitt folgende dimensionslose Wellenparameter im Zusammenhang mit dem maßgebenden hydraulischen Gradienten $i_{\text{max}(6,5)}$ untersucht (siehe auch Abschnitt 2.2.1):

- Brecherindex H/h
- Wellensteilheit H/L
- Produkt aus Brecherindex und Wellensteilheit $H^2/(h \cdot L)$
- Einwirkender Gradient I' an der Oberkante des Filters mit dem dynamischen Druckanteil p_{dyn} nach linearer Wellentheorie

In Abbildung 6.9 ist hierzu auf der Grundlage der Labordaten der Zusammenhang zwischen dem äquivalenten Brecherindex H/h und dem maximalen hydraulischen Gradienten $i_{\text{max}(6,5)}$ und in Abbildung 6.10 zwischen der äquivalenten Wellensteilheit H/L und dem maximalen hydraulischen Gradienten $i_{\text{max}(6,5)}$ dargestellt.

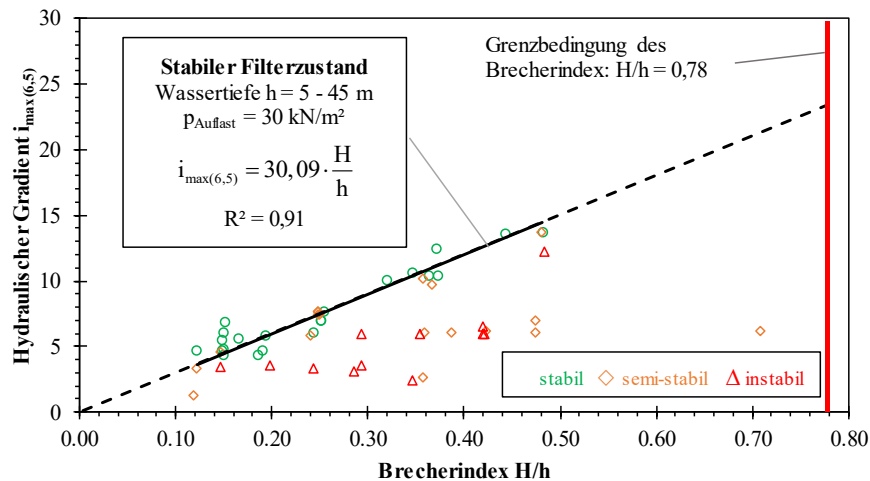


Abb. 6.9: Einfluss des Brecherindex H/h auf den hydraulischen Gradienten $i_{\text{max}(6,5)}$ (Labordaten)

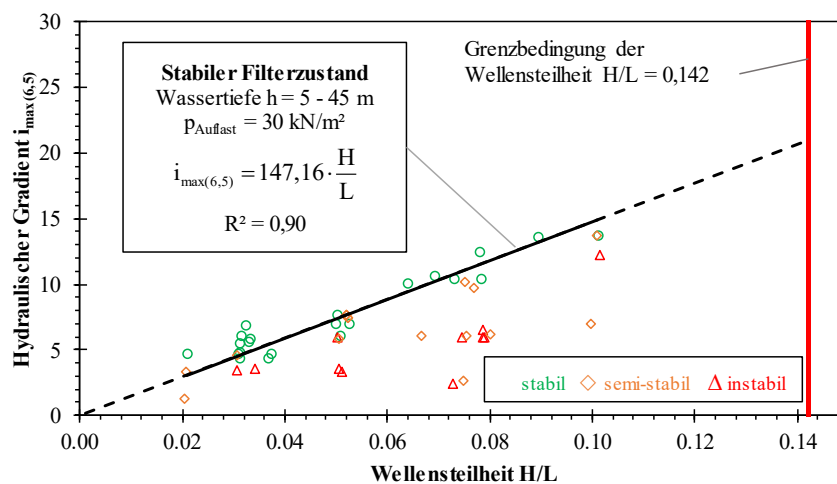


Abb. 6.10: Einfluss der Wellensteilheit H/L auf den hydraulischen Gradienten $i_{\text{max}(6,5)}$ (Labordaten)

Es besteht ein sehr guter Zusammenhang zwischen dem hydraulischen Gradienten $i_{\text{max}(6,5)}$ und den Wellenparametern Brecherindex H/h und Wellensteilheit H/L . Zur vollständigen Berücksichtigung der maßgebenden Wellenparameter ist der hydraulische Gradient $i_{\text{max}(6,5)}$ in Abhängigkeit des Produkts aus H/h und H/L in Abbildung 6.11 mit $[H^2/(h \cdot L)]^{0,5}$ dargestellt.

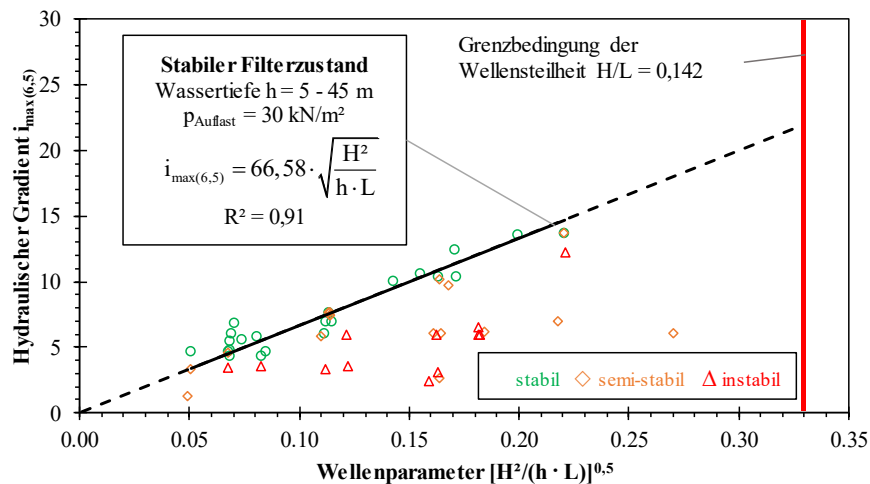


Abb. 6.11: Zusammenhang zwischen $[H^2/(h \cdot L)]^{0,5}$ und dem hydraulischen Gradienten $i_{\text{max}(6,5)}$ (Labordaten)

Der hydraulische Gradient $i_{\text{max}(6,5)}$ nimmt mit steigender Wellenhöhe H , abnehmender Wassertiefe h und abnehmender Wellenlänge L zu. In Abbildung 6.11 ist der lineare Zusammenhang zwischen dem Wellenparameter $[H^2/(h \cdot L)]^{0,5}$ und dem hydraulischen Gradienten $i_{\text{max}(6,5)}$ für den stabilen Filterzustand mit einem Determinationskoeffizienten von $R^2 = 0,91$ dargestellt. Ab dem Bewegungsbeginn (semi-stabil) und dem instabilen Filterzustand ist kein funktionaler Zusammenhang gegeben, da zum einen die lokale Verflüssigung des Basismaterials die Durchlässigkeit erhöht und zum anderen die Infiltration des Basismaterials im Filter die Durchlässigkeit im Filter reduziert. Durch die lokale Verflüssigung nimmt der hydraulische Gradient ab und durch die Reduzierung der Durchlässigkeit im Filter nimmt der hydraulische Gradient zu. Weiterhin nimmt der hydraulische Gradient mit geringerer Turbulenz der Porenströmung ab. Insgesamt kann der Trend zur Reduzierung des hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze bei lokaler Verflüssigung aufgrund der Mischung des Basis- und Filtermaterials festgestellt werden. Durch diesen Prozess kann bei gleicher oder geringerer hydraulischer Belastung ein instabiler Zustand in einen semi-stabilen Zustand resultieren. Dieser Selbstheilungsprozess kann in Abhängigkeit der hydraulischen Belastung zu einer dynamischen Filterstabilität führen.

Es besteht ein funktionaler Zusammenhang zwischen den hydraulischen Gradienten und den Wellenparametern für den stabilen Filterzustand vor dem Bewegungsbeginn ohne Materialumlagerung bei ausreichend hoher Auflast. Der lineare Zusammenhang basiert auf dem in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Ansatz zur Ermittlung der Wellenparameter nach linearer Wellentheorie und ist abhängig von der Durchlässigkeit des untersuchten Filter- und Basismaterials (Abschnitt 3.2.2). Weiterhin unterliegen die Laborexperimente den Einschränkungen der begrenzten Schichtdicke der Basisschicht und der Randbedingung am unteren Rand der Versuchszelle. Durch die Regelung des dynamischen Drucks unterhalb der begrenzten Basisschicht ergeben sich deutlich höhere hydraulische Gradienten gegenüber einer unbegrenzten Basisschicht.

Aus den zuvor angeführten Zusammenhängen zwischen den Wellenparametern (Wellenhöhe H , Wellenlänge L und Wassertiefe h) und dem hydraulischen Gradienten $i_{\text{max}(6,5)}$ zeigt sich ein guter funktionaler Zusammenhang durch den maximalen dynamischen Druckanteil $p_{\text{dyn,max}}$ unter fortschreitenden Wellen nach Dean und Dalrymple (2004) an der Filteroberkante (Gleichung 6.5) mit des einwirkenden Gradienten I' aus Gleichung 6.6 (siehe auch Abschnitt 2.2.1).

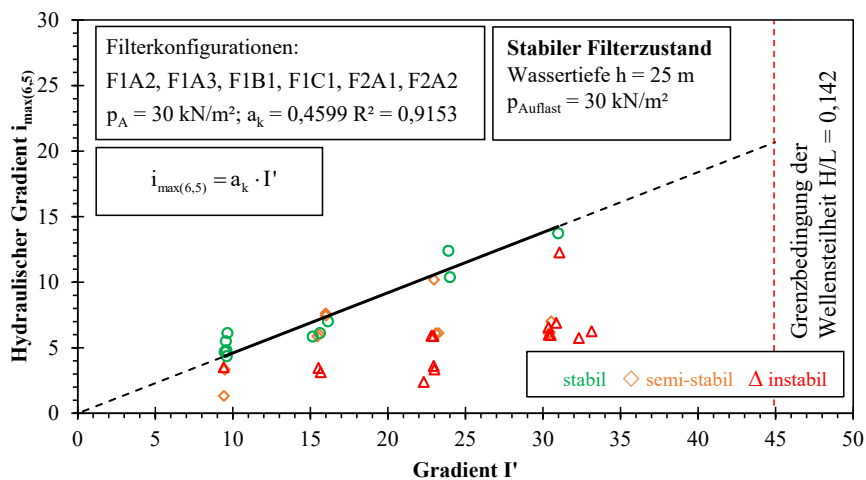
$$p_{\text{dyn,max}} = \rho \cdot g \cdot \frac{H}{2} \cdot \frac{\cosh\left(\frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot SD_F\right)}{\cosh\left(\frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot h\right)} \quad (6.5)$$

$$I' = \frac{p_{\text{dyn,max}}}{\Delta l \cdot \rho \cdot g} \quad (6.6)$$

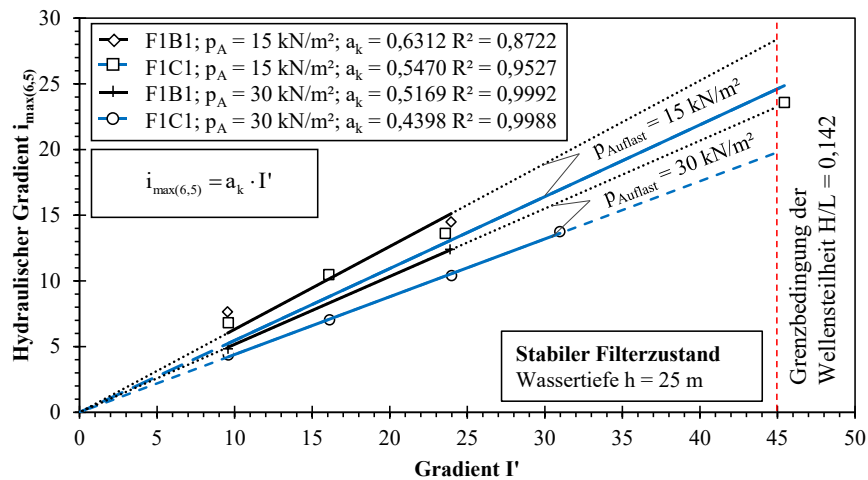
mit:

- $p_{\text{dyn,max}}$: Maximaler dynamischer Druckanteil unter fortschreitenden Wellen an der Filteroberkante in N/m²
 ρ : Rohdichte des Wassers in kg/m³
 g : Erdbeschleunigung in m/s²
 H : Wellenhöhe in m
 L : Wellenlänge in m
 SD_F : Schichtdicke des Filtermaterials in m
 h : Wassertiefe in m
 I' : Einwirkender Gradient an der Filteroberkante (dimensionslos)
 Δl : Sickerweg des hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze (hier: $\Delta l = 0,1$ m)

Der Einfluss des einwirkenden Gradienten I' (aus dem dynamischen Druckanteil p_{dyn} an der Filteroberkante) auf den hydraulischen Gradienten $i_{\text{max}(6,5)}$ an der Schichtgrenze ist in Abbildung 6.12 a) mit den untersuchten Filterkonfigurationen zum stabilen Filterzustand und in Abbildung 6.12 b) für ein enggestuftes Filtermaterial (F1C1, $U_F = 2,3$) und ein weitgestuftes Filtermaterial (F1B1, $U_F = 5,5$) zu zwei Stufen der Filterauflast mit $p_A = 15$ kN/m² und 30 kN/m² dargestellt.



a) Einfluss des einwirkenden Gradienten I' auf den hydraulischen Gradienten $i_{\text{max}(6,5)}$ zum stabilen Zustand des Filters ($h = 25,0$ m; $p_A = 30$ kN/m²) (Labordaten)



b) Einfluss des einwirkenden Gradienten I' auf den hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ zum stabilen Zustand des Filters im Vergleich der Filterauflast $p_A = 15 \text{ kN/m}^2$ und 30 kN/m^2 ($h = 25,0 \text{ m}$) (Labordaten)

Abb. 6.12: Einfluss des Gradienten I' (an der Filteroberkante) auf den hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial

Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen den Wellenparametern (Wellenhöhe H und Wellenperiode T in Wassertiefe h) und dem maximalen dynamischen Druckanteil $p_{\text{dyn,max}}$ nach linearer Wellentheorie (Gleichung 6.5) und zwischen den Wellenparametern (H , T und h) und des einwirkenden Gradienten I' nach Gleichung 6.6. Hierdurch kann der maximale hydraulische Gradient $i_{\max(6,5)}$ unter Berücksichtigung des Durchlässigkeits des Filtermaterials $k_{f,F}$ und der Filterauflast p_A mit dem Koeffizienten a_k nach folgender Gleichung beschrieben werden:

$$i_{\max(6,5)} = a_k \cdot I' \quad (6.7)$$

mit:

$i_{\max(6,5)}$: maximaler hydraulischer Gradient an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial
 a_k : Koeffizient unter Berücksichtigung der Durchlässigkeit des Filtermaterials $k_{f,F}$ und der Filterauflast p_A
 I' : einwirkender Gradient an der Filteroberkante (dimensionslos)

Der Koeffizient a_k berücksichtigt damit den Einfluss der Durchlässigkeit des Filtermaterials $k_{f,F}$. Weiterhin steht die Durchlässigkeit $k_{f,F}$ unter dem Einfluss der Filterauflast p_A (Abbildung 6.12 b). Mit abnehmender Filterauflast p_A nimmt die Durchlässigkeit $k_{f,F}$ durch die Ausdehnung des Porenraums aufgrund der geringeren effektiven Spannung in der Bodenmatrix zu.

Tab. 6.2: Koeffizient a_k für zwei Filtermaterialien (F1B1, F1C1) unter Berücksichtigung der Filterdurchlässigkeit $k_{f,F}$ und der Filterauflast p_A ($h = 25 \text{ m}$)

Filtermaterial	Durchlässigkeitsbeiwert $k_{f,F}$ ¹⁾	Auflast	Koeffizient a_k	Bestimmtheitsmaß R^2
	m/s	kN/m ²	-	-
F1B1	$7,0 \cdot 10^{-2}$	15	0,6312	0,8722
		30	0,5169	0,9992
F1C1	$3,5 \cdot 10^{-3}$	15	0,5470	0,9527
		30	0,4398	0,9988

¹⁾ nach Hazen (siehe Abschnitt 2.2.3)

Durch die Analyse des Zusammenhangs zwischen dem maßgebenden hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ und den Wellenparametern (H , T und h) unter Berücksichtigung der Durchlässigkeit $k_{f,F}$ und der Auflast des Filtermaterials p_A bei gleichem Basismaterials ($d_{50B} = 0,25 \text{ mm}$) konnten folgende wichtigste Ergebnisse erreicht werden:

- Der maßgebende hydraulische Gradient $i_{\max(6,5)}$ wird durch die Wellenhöhe H bestimmt und nimmt mit steigender Wellensteilheit H/L , steigendem Brecherindex H/h , mit abnehmender relativer Wassertiefe h/L (unter der Anwendung der linearen Wellentheorie) linear zu.
- Die Einwirkung der Gradienten I' an der Filteroberkante kann nach Gleichung 6.6 und der hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ nach Gleichung 6.7 ermittelt werden. Der hierin enthaltene Koeffizienten a_k (nach Tabelle 6.2) erfasst den Einfluss der Durchlässigkeit $k_{f,F}$ und der Auflast des Filters p_A .
- Im Vergleich der Stabilitätszustände (stabil, semi-stabil und instabil) wird der höchste hydraulische Gradient $i_{\max(6,5)}$ zum stabilen Filterzustand erreicht und nimmt durch lokale Verflüssigung deutlich ab.
- Der Anfangszustand zum Einbau des Filtermaterials ist damit den höchsten hydraulischen Einwirkungen ausgesetzt. Aufgrund der höheren Porosität n_B und Durchlässigkeit $k_{f,B}$ des Basismaterials $k_{f,B}$ unterhalb der Schichtgrenze sowie der Abnahme der Porosität n_F und der Durchlässigkeit des Filtermaterials $k_{f,F}$ oberhalb der Schichtgrenze nimmt der hydraulische Gradient $i_{\max(6,5)}$ zum semi-stabilen und instabilen Zustand des Filters ab.
- Es besteht ein großer Einfluss des hydrostatischen Drucks auf den dynamischen Druck an der unter Randbedingung der Versuchszelle, sodass weitere Untersuchungen ohne den Einfluss dieses Modelleffekts erforderlich werden.

Durch die Auswahl des hydraulisch stabilen Zustands der jeweiligen Filterkonfiguration kann ein funktionaler Zusammenhang zwischen den Wellenparametern (Wellenhöhe H , Wellenperiode T in Wassertiefe h) hergestellt werden.

Modelleffekte: Die Porenwasserdruckverteilung der hydraulischen Modellversuche unterliegt jedoch dem Einfluss der Anlagensteuerung (siehe Abschnitt 6.1.3). Eine Korrektur der unteren Randbedingung im Laborexperiment erfolgt auf der Grundlage von numerischen Untersuchungen des Einflusses der Dicke der Basisschicht auf den maßgebenden hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ an der Schichtgrenze (Basis/Filter). Somit wird der Porenwasserdruck im Basis- und Filtermaterial durch die Druckdämpfung in einer ausreichenden Schichtdicke des Basismaterials ($SD_B = 3,00 \text{ m}$) im numerischen Modell korrekt abgebildet.

Ergebnisse der numerischen Untersuchungen: Mit Hilfe des validierten numerischen Modells konnten die Laborexperimente im Umfang der hydraulischen Parameter sowie mit einer größeren Dicke der Basisschicht erweitert werden. Die Laborversuche ergeben mit der Unterstützung numerischer Untersuchungen folgende Ergebnisse:

- i) Verbesserung des Verständnisses der hydraulischen Prozesse: Transmission, Dämpfung des Porenwasserdrucks der resultierenden räumlichen und zeitlichen Entwicklung des Porenwasserdrucks;
- ii) Herleitung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen Wellenparametern (Wellenhöhe H , Wellenperiode T , Wellenlänge L in Wassertiefe h) und hydraulischem Gradienten im Filteraufbau in Abhängigkeit der Durchlässigkeitsbeiwertes des Filtermaterials $k_{f,F}$.

Gleichung 6.7 dient damit als wichtige Grundlage für die Modellbildung der hydraulischen Stabilität von Kornfilter unter Welleneinwirkung (in Kapitel 7).

6.2 Welleninduzierte Porenwasserströmung im Filteraufbau

Die zyklisch oszillierende Porenwasserströmung im Basis- und Filtermaterial in der Wechseldurchströmungsanlage simuliert die welleninduzierte Strömung. In diesem Abschnitt wird diese Porenwasserströmung analysiert, um das Prozessverständnis für die Modellierung der Strömung im Filteraufbau zu verbessern und um die erforderlichen Grundlagen für die Modellbildung der hydraulischen Filterstabilität zu schaffen. Die vertikale Fließgeschwindigkeit der Porenwasserströmung v_f entspricht der vertikalen Komponente der welleninduzierten Filtergeschwindigkeit und wird in Abschnitt 6.2.1 zur Modellierung der Porenwasserströmung im Basis- und Filtermaterial für folgende Zwecke beschrieben:

- (i) Einfluss der Wellenhöhe auf die maximale welleninduzierte Filtergeschwindigkeit v_f ,
- (ii) Charakterisierung des Strömungsregimes mit der kornbezogenen Reynolds-Zahl Re^* und
- (iii) Einfluss des Sättigungsgrads S auf Durchlässigkeit und Porenwasserströmung.

Aus der Analyse des Zusammenhangs zwischen der Filtergeschwindigkeit v_f und dem hydraulischen Gradienten i werden die Forchheimer-Koeffizienten a und b und anschließend die entsprechenden Widerstandskoeffizienten α und β durch Regressionsanalysen ermittelt (Abschnitt 6.2.2). Durch die Analyse der Laborexperimente zu den Widerstandskoeffizienten werden folgende Ziele erreicht:

- (i) Einordnung des untersuchten Strömungsregimes in den Laborexperimenten mit Untersuchungen aus der Literatur,
- (ii) Beitrag zu den Widerstandskoeffizienten in weitgestuften Kornfiltern und
- (iii) Verbesserung der numerischen Modellierung der Porenwasserströmung durch Ermittlung eines geeigneten Ansatzes.

Da die Filtergeschwindigkeit bei der Parallelschaltung der Basis- und Filterschicht durch die geringere Durchlässigkeit der Basisschicht bestimmt wird, ist es zweckmäßig, die Widerstandskoeffizienten der Forchheimer-Gleichung für die einzelnen Schichten und für den gesamten Aufbau mit Basis- und Filterschicht zu bestimmen. Zu diesem Zweck wird der Fließwiderstand des Basis- und Filtermaterials sowie der Fließwiderstand der gesamten Probe bestehend aus Basis- und Filtermaterial dargestellt und diskutiert.

6.2.1 Vertikale Filtergeschwindigkeit

Die vertikale Filtergeschwindigkeit v_f entsteht durch den Druckgradienten $i_{1,9}$ welcher durch die äußeren sinusförmigen Druckrandbedingungen und durch den Fließwiderstand des porösen Mediums erzeugt wird. Unter oszillierender Strömung ändert die Fließgeschwindigkeit die Strömungsrichtung und erreicht den Maximalwert $v_{f,max}$ zum Zeitpunkt des Wellenbergs und Wellentals. Die aufwärtsgerichtete Strömungskomponente ist maßgebend für den Bewegungsbeginn und wird daher mit positivem Vorzeichen definiert.

Die Zeitreihe der Filtergeschwindigkeit v_f wird zur Ermittlung der maximalen Filtergeschwindigkeit $v_{f,max}$ analysiert und zu folgenden Einflüssen untersucht:

- Einfluss der äquivalenten Wellenhöhe H_{eq}
- Einfluss der äquivalenten Wellenperiode T_{eq}
- Einfluss der Durchlässigkeit im Zusammenhang mit den bodenmechanischen Prozessen
- Untersuchung des Strömungsregimes in den Laborexperimenten (siehe Abschnitt 2.2.3)
- Einfluss des Sättigungsgrads S auf die Filtergeschwindigkeit v_f

Die Zeitreihe der Filtergeschwindigkeit v_f ist mit der maximalen Filtergeschwindigkeit $v_{f,max}$ in Abbildung 6.13 für drei Wellenhöhen H_{eq} dargestellt.

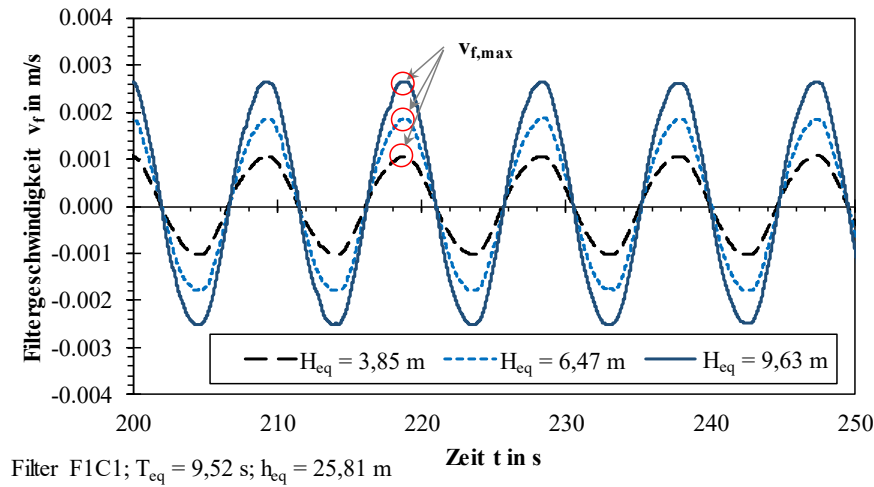


Abb. 6.13: Zeitreihen der Filtergeschwindigkeit v_f für drei verschiedene Wellenhöhen H_{eq} (Labordaten)
(Filtermaterial F1C1: $d_{15F}/d_{85B} = 2,3$; $d_{60F}/d_{10F} = 2,3$; $T_{eq} = 9,52$ s; $h_{eq} = 25,81$ m)

Die Periode der Filtergeschwindigkeit ist gleich der eingesteuerten Periode der Druckänderung. Im Beispiel der Zeitreihe aus Abbildung 6.13 entspricht sie der äquivalenten Wellenperiode $T_{eq} = 9,52$ s. Die Amplitude der Filtergeschwindigkeit wird durch die äquivalente Durchlässigkeit der gesamten Probe bestimmt ($k_{f,eq} = 6,8 \cdot 10^{-4}$ m/s). Die Zeitreihe der Filtergeschwindigkeit folgt dem in der Versuchsanlage geregelten sinusförmigen Druckverlauf.

Wellenhöhe H_{eq} : In Abbildung 6.14 ist die maximale Filterschwindigkeit $v_{f,max}$ in Abhängigkeit der äquivalenten Wellenhöhe H_{eq} und der Filtermaterialien dargestellt. Der funktionale Zusammenhang ist für die Filterkonfigurationen im stabilen Filterzustand und im Vergleich mit dem semi-stabilen Filterzustand dargestellt.

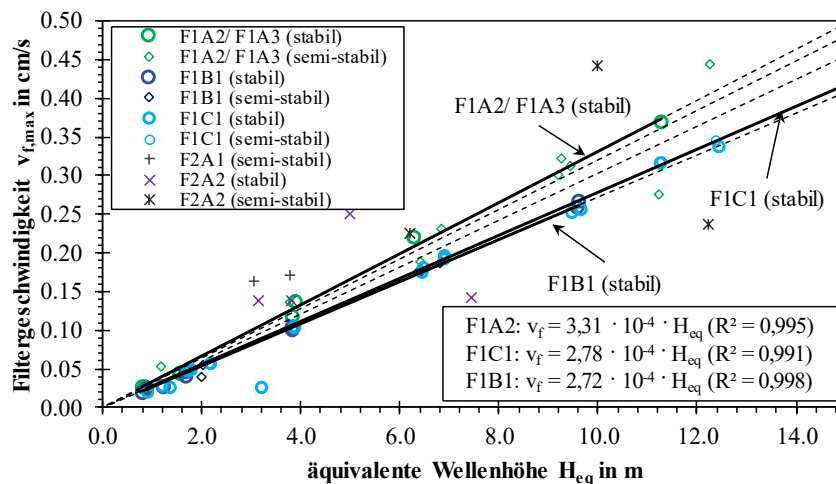


Abb. 6.14: Einfluss der äquivalenten Wellenhöhe H_{eq} auf die maximale Filtergeschwindigkeit $v_{f,max}$ (Filterkonfigurationen F1A2, F1A3, F1B1, F1C1, F2A1, F2A2) (Labordaten)

Der Zusammenhang zwischen der äquivalenten Wellenhöhe H_{eq} und der maximalen Filtergeschwindigkeit $v_{f,max}$ kann für die einzelnen Filter im stabilen Zustand mit sehr guter Übereinstimmung durch eine lineare Funktion wie folgt (im stabilen Filterzustand ohne Materialumlagerungen) beschrieben werden:

$$v_{f,\max} = a_f \cdot H_{eq} \quad (6.8)$$

mit:

$v_{f,\max}$: maximale Filtergeschwindigkeit in m/s

a_f : Durchlässigkeitsfaktor in s^{-1}

H_{eq} : äquivalente Wellenhöhe in m

Wellenperiode T_{eq} : Die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Wellenperiode T_{eq} und Filtergeschwindigkeit v_f erfordert aufgrund der geringen Variation der Wellenperiode (mit $T_{eq} = 7,25$ s bis $12,50$ s) in den Laborexperimenten weitere Untersuchungen. Der Einfluss der Wellenperiode T_{eq} auf die Filtergeschwindigkeit v_f und den hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ wird daher durch numerische Simulationen untersucht (siehe Abschnitt 7.1.1).

Durchlässigkeit des Filtermaterials: Der Durchlässigkeitsfaktor a_f in Gleichung 6.8 ist der Proportionalitätsfaktor in Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes des Filtermaterials zur Ermittlung der maximalen Filtergeschwindigkeit $v_{f,\max}$. Die Filterkonfigurationen F1A2 ($d_{15F}/d_{85B} = 4,5$; $d_{60F}/d_{10F} = 5,9$; $k_{f,F} = 7,06 \cdot 10^{-3}$ m/s) und F1A3 ($d_{15F}/d_{85B} = 4,3$; $d_{60F}/d_{10F} = 6,6$; $k_{f,F} = 6,53 \cdot 10^{-3}$ m/s) weisen eine größere Steigung, ausgedrückt durch den Durchlässigkeitsfaktor a_f , gegenüber den Filterkonfigurationen F1B1 ($d_{15F}/d_{85B} = 19,9$; $d_{60F}/d_{10F} = 5,5$; $k_{f,F} = 8,13 \cdot 10^{-2}$ m/s) und F1C1 ($d_{15F}/d_{85B} = 2,3$; $d_{60F}/d_{10F} = 2,3$; $k_{f,F} = 3,48 \cdot 10^{-3}$ m/s) auf. Da die Filtergeschwindigkeit hauptsächlich durch das gleiche Basismaterial bestimmt wird, sind die Durchlässigkeitsfaktoren auf die unterschiedlichen Durchlässigkeiten der Filtermaterialien zurückzuführen.

Bodendynamische Prozesse: Die Durchlässigkeit wird durch Verdichtung des Filtermaterials, Abnahme der Porosität und durch Infiltration des Basismaterials in den Porenraum des Filters deutlich reduziert. Diese Änderungen werden insbesondere für das Filtermaterial F1B1 anhand des relativ geringen Durchlässigkeitsfaktors a_f sichtbar. Im semi-stabilen Filterzustand treten deutliche Abweichungen zum linearen Zusammenhang auf, da die lokale Verflüssigung (Kontakterosion) an der Schichtgrenze und der Porenwasserüberdruck den Fließwiderstand stark reduzieren und damit die Filtergeschwindigkeit $v_{f,\max}$ in der Basis- und Filterschicht stark erhöht. Der Fließwiderstand wird anschließend im Verlauf der Wellenperiode durch Infiltration und Verfestigung wieder stark reduziert. In diesem Fall ist kein funktionaler Zusammenhang zwischen der Wellenhöhe H_{eq} und der Filtergeschwindigkeit $v_{f,\max}$ gegeben.

Kornbezogene Reynolds-Zahl: In Abbildung 6.15 ist die kornbezogene Reynolds-Zahl Re^* in Bezug auf die Filtergeschwindigkeit v_f und dem Korndurchmesser des Filtermaterials d_{15F} im Zusammenhang mit dem hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ dargestellt.

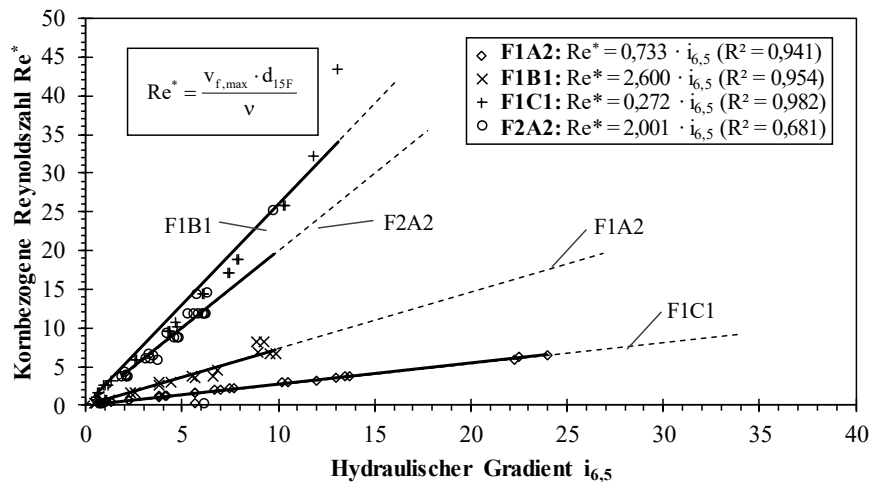


Abb. 6.15: Einfluss des hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ auf die kornbezogene Reynolds-Zahl Re^* (Labordaten im stabilen Filterzustand ohne Materialbewegung)

Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem hydraulischen Gradienten $i_{6,5}$ und der kornbezogenen Reynoldszahl im Bereich des Darcy-Strömungsregimes durch die Abhängigkeit von der Filtergeschwindigkeit v_f (siehe Abschnitt 2.1.5 und 2.2.3). Die Steigung der linearen Funktion nimmt mit steigender Durchlässigkeit zu. Während ein sehr guter Zusammenhang zwischen $i_{6,5}$ und Re^* für das Filtermaterial F1C1 besteht, ist für das Filtermaterial F1A2, F1B1 und F2A2 jeweils ein nichtlineares Verhalten bei Gradienten $i_{6,5} > 5$ erkennbar. Das nichtlineare Verhalten entsteht durch die höhere Durchlässigkeit in Abhängigkeit der Porengeometrie (bestimmt durch Kornverteilung und Porosität) des jeweiligen Filtermaterials. Die Porenwasserströmung im Filter kann in diesem Fall nicht mehr mit der Darcy-Gleichung beschrieben werden und die Anwendung der Forchheimer-Gleichung bei $Re > 5$ wird erforderlich. Weiterhin können Abweichungen vom linearen Verhalten durch die Kontakterosion an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial entstehen, da die kornbezogene Reynolds-Zahl Re^* mit der Filtergeschwindigkeit v_f und dem abnehmenden hydraulischen Gradienten ansteigt.

Sättigungsgrad: Darüber hinaus unterliegt Re^* dem Einfluss des Sättigungsgrads S . Hierzu ist das Ergebnis der Parameterstudie mit dem numerischen Modell zu dem Zusammenhang zwischen dem Sättigungsgrad S und der Filtergeschwindigkeit $v_{f,max}$ in Abbildung 6.16 dargestellt.

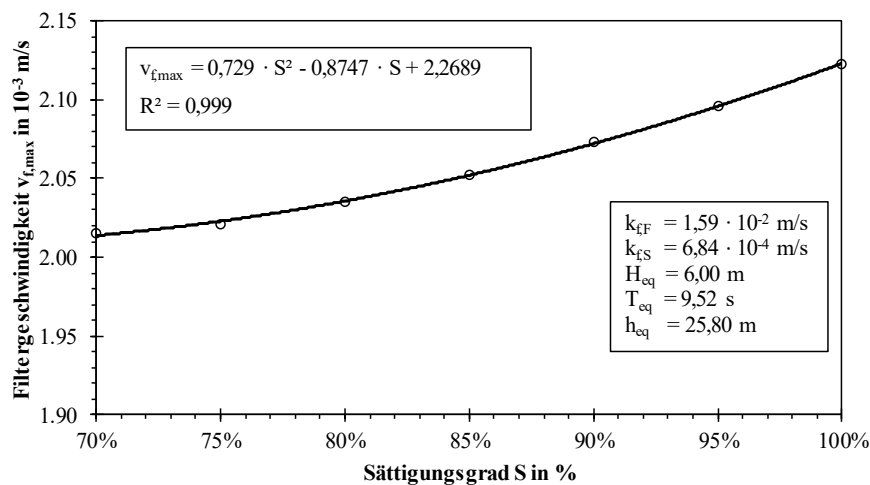
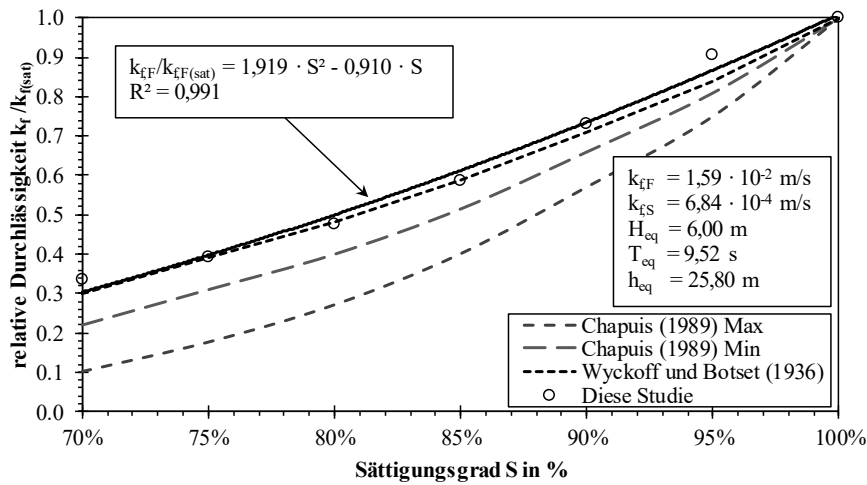
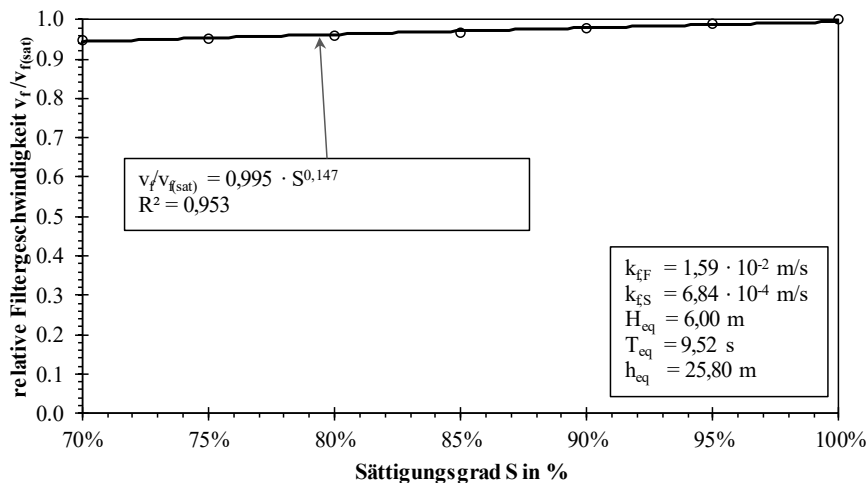


Abb. 6.16: Einfluss des Sättigungsgrads S auf die Filtergeschwindigkeit $v_{f,max}$ (numerische Simulation)

Zur Einordnung der Ergebnisse ist in Abbildung 6.17 der Vergleich mit den Laboruntersuchungen nach Wyckoff und Botset, 1936 und Chapuis (1989) dargestellt.



a) Einfluss des Sättigungsgrads S auf die relative Durchlässigkeit $k_f/k_{f(sat)}$ in dieser Studie im Vergleich zu den Laboruntersuchungen nach Wyckoff und Botset (1936) und Chapuis et al. (1989)



b) Einfluss des Sättigungsgrads S auf die relative Filtergeschwindigkeit $v_f/v_{f(sat)}$ in dieser Studie

Abb. 6.17: Numerische Untersuchungen zum Einfluss des Sättigungsgrads S auf die relative Durchlässigkeit und relative Filtergeschwindigkeit ($H_{eq} = 6,00$ m; $T_{eq} = 9,52$ s; $h_{eq} = 25,80$ m)

Die relative Durchlässigkeit $k_f/k_{f(sat)}$ in Abbildung 6.17 a) nimmt bei abnehmendem Sättigungsgrad S durch den erhöhten Fließwiderstand ab und nähert sich $k_f/k_{f(sat)} \rightarrow 0$. Der Zusammenhang zwischen Sättigungsgrad und relativer Durchlässigkeit wird durch Porengeometrie, Strömungsregime und Randbedingungen in den Laborexperimenten beeinflusst. In den Untersuchungen nach Wyckoff und Botset (1936) und Chapuis et al. (1989) wurde feines Material (Sand) mit gleichgerichteter Strömung verwendet. Im Vergleich der Ansätze in Abbildung 6.17 a) ergibt sich nach Chapuis (1989) eine wesentlich geringere relative Durchlässigkeit. Ein Grund dafür ist, dass in den Laborexperimenten nach Chapuis et al. (1989) keine vollständige Luftdichtigkeit erreicht wurde, sodass die Ergebnisse großen Unsicherheiten unterliegen. Ein Vergleich der numerischen Parameterstudie mit den Ergebnissen nach Chapuis et al. (1989) ist daher nur qualitativ möglich. Es besteht jedoch eine relativ gute Übereinstimmung der Ergebnisse nach Wyckoff und Botset (1936) mit der relativen Durchlässigkeit $k_f/k_{f(sat)}$ des Filtermaterials dieser Studie mit einer maximalen Abweichung von 7,1 % (für Sättigungsgrade $S \geq 75$ %). Der Einfluss

des Sättigungsgrads S auf die relative Filtergeschwindigkeit $v_f/v_{f(sat)}$ (Abbildung 6.17 b)) ist für die numerischen Untersuchungen mit maßgebenden Sättigungsgraden in größeren Wassertiefen ($S > 95 \%$, siehe Abschnitt 2.2.2) vernachlässigbar gering.

Zusammenfassend gibt die kornbezogene Reynolds-Zahl Re^* Aufschluss über das Strömungsregime im Porenraum der untersuchten porösen Medien und dient zur Einordnung und Vergleich der Untersuchungen dieser Studie mit den untersuchten Porenwasserströmungen in der Literatur. Der Sättigungsgrad beziehungsweise der Gasanteil im Porenraum haben einen hohen Einfluss auf die relative Durchlässigkeit und einen sehr geringen Einfluss auf die relative Filtergeschwindigkeit aufgrund der relativ geringen Filtergeschwindigkeiten in den Laborexperimenten und numerischen Untersuchungen.

6.2.2 Forchheimer- und Widerstandskoeffizienten der Strömung im Basis- und Filtermaterial

Der Zusammenhang zwischen hydraulischem Gradienten und der Filtergeschwindigkeit wird mit der Forchheimer-Gleichung 2.22 beschrieben. Der Forchheimer-Koeffizient a wird durch Regressionsanalyse mit der linearen Funktion $i = a \cdot v_f$ beschrieben und anschließend zur Ermittlung des Forchheimer-Koeffizienten b in der Forchheimer-Gleichung eingesetzt. Die Widerstandskoeffizienten werden auf der Grundlage der Laborexperimente in Abhängigkeit der Porosität n und der charakteristischen Korndurchmesser $d_c = d_{15}$ und d_{50} (siehe auch Tabelle 2.4) für den stabilen Filterzustand (ohne Materialumlagerung) ermittelt. In den Laborexperimenten wird durchgängig ein Sandboden mit einem mittleren Korndurchmesser von $d_{50B} = 0,252 \text{ mm}$ und einer Ungleichförmigkeit von $U = 1,29$ als Basismaterial verwendet (siehe auch Abschnitt 3.2.2). Der Fließwiderstand der Porenwasserströmung im Basismaterial wird anhand des Porenwasserdrucks sowie mit der Filtergeschwindigkeit v_f ermittelt. Der hydraulische Gradient $i_{5,9}$ ergibt sich dabei aus dem dynamischen Porenwasserdruck zwischen der Schichtgrenze zum Filter und zum unteren Rand der Basisschicht. Der hydraulische Gradient i ist gegenüber der Filtergeschwindigkeit v_f in folgender Reihenfolge in Abbildung 6.18 und 6.19 dargestellt:

- a) Hydraulischer Gradient in der Filterschicht $i_{5,1}$
- b) Hydraulischer Gradient an der Schichtgrenze $i_{6,5}$
- c) Hydraulischer Gradient im Basismaterial $i_{9,5}$

Die Fließwiderstände des Basis- und Filtermaterials werden in Abbildung 6.18 und 6.19 mit den Forchheimer-Koeffizienten wie folgt angegeben:

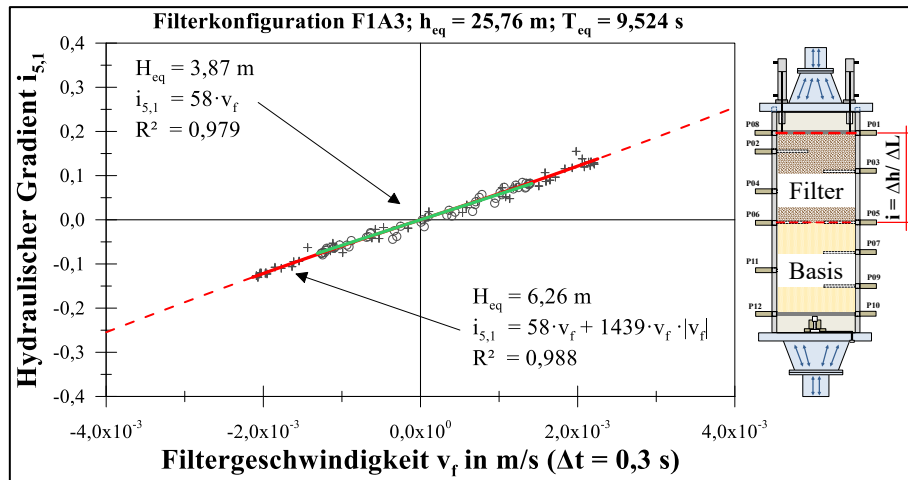
- Forchheimer-Koeffizient a im Darcy-Strömungsregime mit $Re^* \leq 1$ nach folgender Gleichung:

$$i = a \cdot v_f \quad (6.9)$$

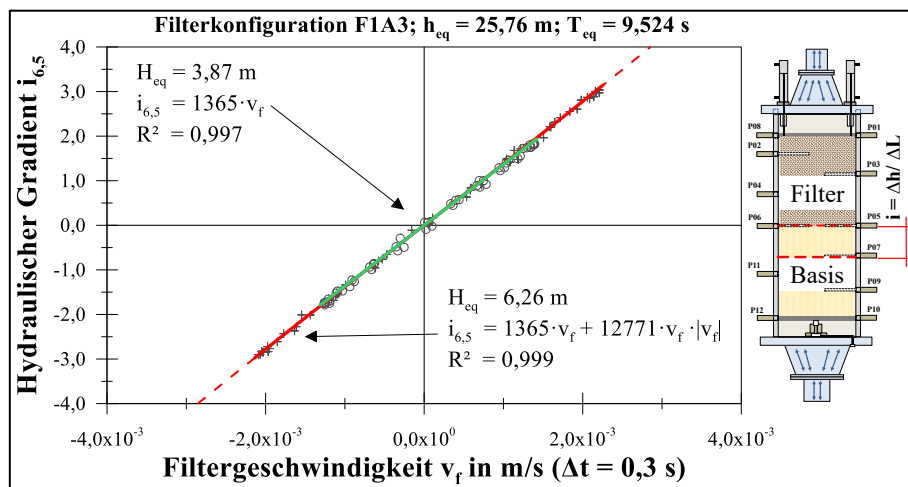
- Forchheimer-Koeffizient b basierend auf a im Übergangsbereich der Darcy-Forchheimer-Strömungsregimes mit $Re^* \geq 1$ nach folgender Gleichung:

$$i = a \cdot v_f + b \cdot v_f \cdot |v_f| \quad (6.10)$$

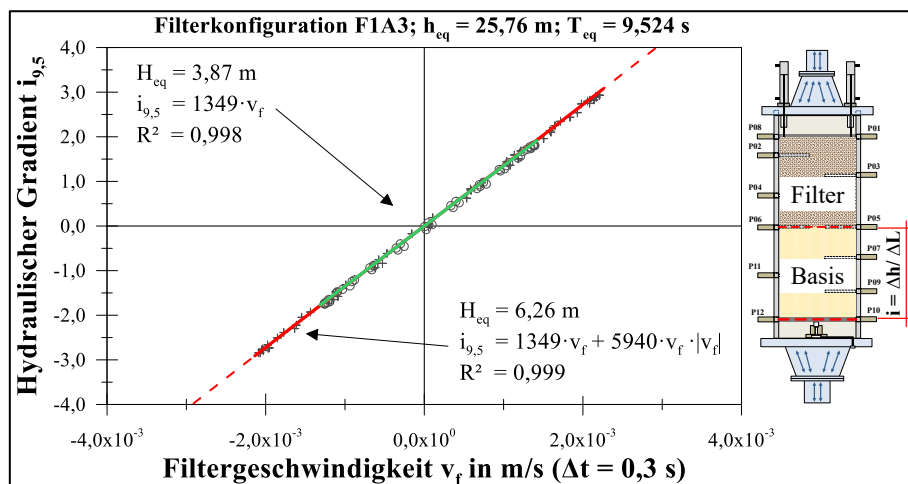
Für den stabilen Filterzustand (ohne Materialumlagerung) ist der hydraulische Gradient i im Basis- und Filtermaterial (am Beispiel der Filterkonfiguration F1A3) gegenüber der Filtergeschwindigkeit v_f in Abbildung 6.18 dargestellt. Das gleiche Vorgehen wird für weitere Filterkonfigurationen in Abbildung 6.19 zusammengefasst.



a) Hydraulischer Gradienten $i_{5,1}$ in der Filterschicht (zur besseren Darstellung auf $i_{5,1}: \pm 0,4$ skaliert)



b) Hydraulischer Gradient $i_{6,5}$ an der Schichtgrenze bis 10 cm unterhalb



c) Hydraulischer Gradient $i_{9,5}$ im Basismaterial

Abb. 6.18: Zusammenhang zwischen dem hydraulischen Gradienten i in der Basis- und Filterschicht und der Filtergeschwindigkeit v_f (Labordaten)

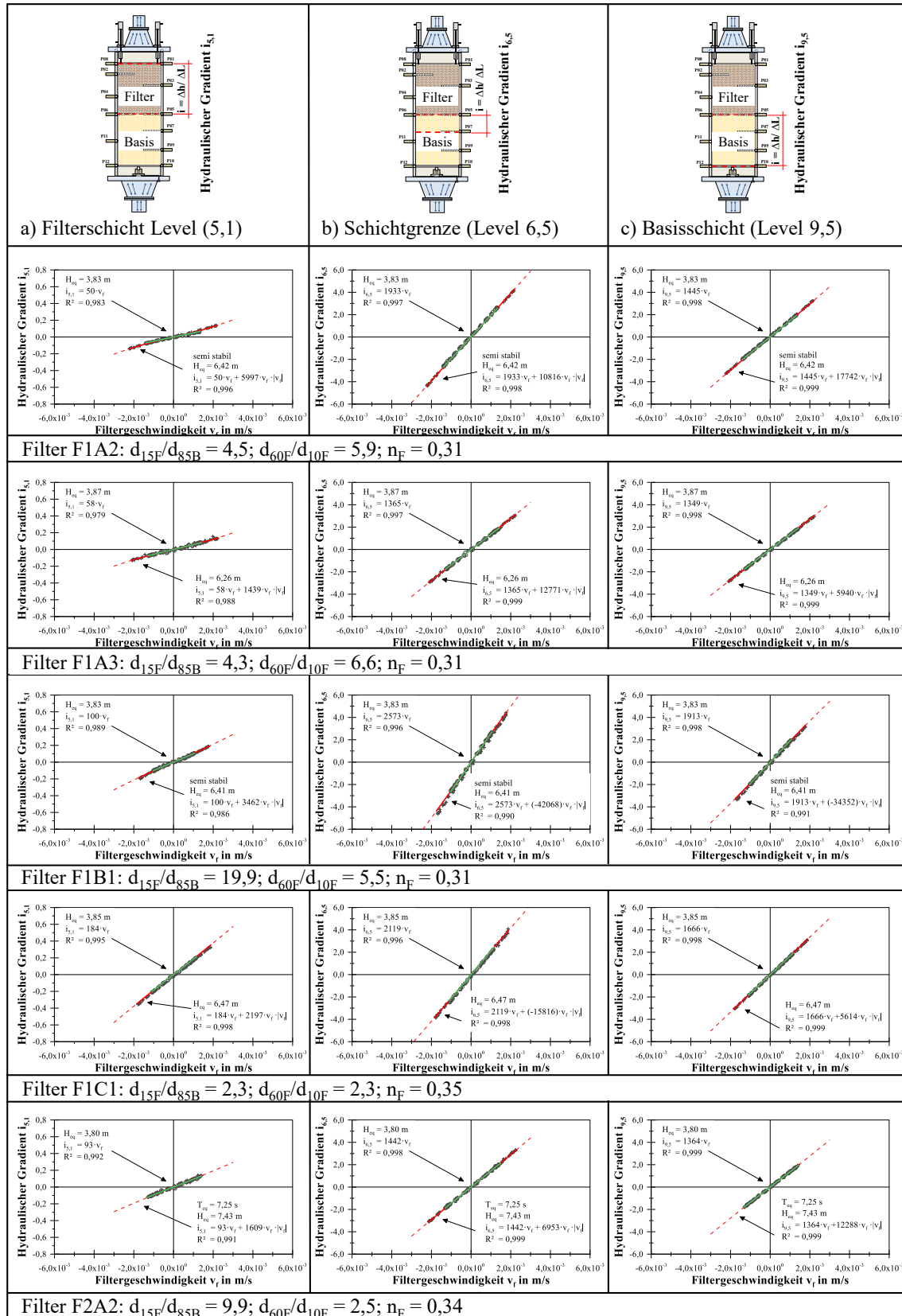


Abb. 6.19: Zusammenhang zwischen hydraulischem Gradienten i und Filtergeschwindigkeit v_f im stabilen Filterzustand (ohne Materialumlagerung) für verschiedene Filterkonfigurationen im Überblick: a) in der Filterschicht $i_{s,1}$ (skaliert auf $i_{s,1} \pm 0,8$), b) unterhalb der Schichtgrenze $i_{s,5}$ (skaliert auf $i_{s,1} \pm 6,0$), und c) in der Basisschicht $i_{s,5}$ (skaliert auf $i_{s,1} \pm 6,0$) für $T_{eq} = 9,52$ s; $h_{eq} = 25,8$ m (Labordaten)

Die Forchheimer-Koeffizienten a und b werden zum stabilen Zustand des Filters ermittelt. Dazu wird wie folgt in das Darcy- und Darcy-Forchheimer-Strömungsregime unterschieden (siehe Abschnitt 2.1.5 und 2.2.3):

1. Ermittlung des Forchheimer-Koeffizienten a bei geringer Wellenhöhe $H_{eq} \approx 3,8$ m im Darcy-Strömungsregime mit $Re^* \leq 1$ durch Regressionsanalyse mit der Darcy-Gleichung:

$$a = \frac{v_f}{i} \quad (6.11)$$

2. Ermittlung des Forchheimer-Koeffizienten b bei höherer Wellenhöhe $H_{eq} \approx 6,4$ m im Übergangsbereich des Darcy-Forchheimer-Strömungsregimes mit $Re^* \geq 1$ durch Regressionsanalyse mit der Forchheimer-Gleichung unter Verwendung des zuvor ermittelten Koeffizienten a aus Gleichung 6.11:

$$b = \frac{i - (a \cdot v_f)}{v_f \cdot |v_f|} \quad (6.12)$$

Das Einsetzen der Gleichung 6.11 in 6.12 setzt voraus, dass der Forchheimer-Koeffizient a unabhängig vom Grad der Turbulenz der Porenwasserströmung gültig ist. Bisherige Ansätze (u.a. van Gent (1993)) beziehen sich bei der Ermittlung des Forchheimer-Koeffizienten b unter oszillierender Strömung auf den Koeffizienten a unter stationärer Strömung. In dieser Studie werden die Forchheimer-Koeffizienten nach Gleichung 6.11 direkt unter oszillierender Strömung jedoch bei geringen hydraulischen Gradienten ermittelt. Die zusätzlichen nichtlinearen Fließwiderstände (unter anderem durch Turbulenz, gestörter Grenzschichtausbildung im Porenraum und Trägheit des Porenfluids) werden im Forchheimer-Koeffizienten b erfasst. Die Anpassung der Forchheimer-Gleichung mit den Forchheimer-Koeffizienten a und b zeigt im stabilen Filterzustand (ohne Materialbewegungen) ein sehr hohes Bestimmtheitsmaß mit $R^2 \geq 0,98$ für die untersuchten hydraulischen Bedingungen und Filtermaterialien und ermöglicht somit eine gute Beschreibung des Fließwiderstands des Basis- und Filtermaterials in dieser Studie. Für größere Filtermaterialien mit einer höheren Durchlässigkeit und zur detaillierten Betrachtung der Massenträgheit des Porenwassers ist eine Erweiterung der Forchheimer-Gleichung mit dem Koeffizienten c nach Polubarinova-Kochina (1962) erforderlich. Ebenso kann der Einfluss der Wellenperiode T durch die Keulegan-Carpenter-Zahl KC nach van Gent (1993) auf den Forchheimer-Koeffizienten b beschrieben werden (siehe Abschnitt 2.2.3). Der Einfluss der Keulegan-Carpenter-Zahl bedarf weiterer Untersuchungen in einem erweiterten Bereich der Wellenperiode T bei sonst gleicher Wellenhöhe H und Wassertiefe h .

Die Gegenüberstellung von Filtergeschwindigkeit v_f und hydraulischem Gradienten $i_{5,1}$ zeigt den Fließwiderstand sowie das Strömungsregime in Abhängigkeit des Turbulenzgrads, definiert durch die kornbezogene Reynolds-Zahl Re^* (siehe Abschnitt 2.2.3). Bei geringen Wellenhöhen ($H_{eq} \approx 3,85$ m, $h_{eq} = 25,0$ m, $T_{eq} = 9,52$ s) und einer geringen kornbezogenen Reynolds-Zahl ($Re^* = < 1$) kann der Forchheimer-Koeffizient a mit dem Darcy-Gesetz ermittelt werden. Für höhere Wellenhöhen ($H_{eq} \approx 6,4$ m, $h_{eq} = 25,0$ m, $T_{eq} = 9,52$ s) und steigendem Grad der Turbulenz ($Re^* > 1$) im Darcy-Forchheimer-Fließregime wird der Forchheimer-Koeffizient b durch Regressionsanalyse mit dem zuvor ermittelten Forchheimer-Koeffizienten a bestimmt. Dieses Vorgehen wird in gleicher Weise für die untersuchten Filterkonfigurationen (F1A2, F1A3, F1B1, F2A1, F2A2) durchgeführt und in Tabelle 6.3 zusammengefasst.

Tab. 6.3: Forchheimer-Koeffizienten und Widerstandskoeffizienten der Filterkonfigurationen (unter oszillierender Strömung mit $H_{eq} = 6,4$ m, $T_{eq} = 9,52$ s, $h_{eq} = 25,8$ m) (Labordaten)

Filter ¹⁾	Filtereigenschaften		Forchheimer-Koeffizienten				Reynolds-Zahl
	d_{15F}	n_F	Koeffizient		Widerstand ²⁾		$Re^* = \frac{v_f \cdot d_{10F}}{\nu}$
			a	b	α	β	
	mm	-	s/m	s ² /m ²	-	-	-
F1A2	1,2	0,31	50	5997	43,2	3,0	1,48
F1A3	1,2	0,31	58	1439	48,0	0,7	1,66
F1B1	5,4	0,31	100	3462	88,1	1,8	4,61
F1C1	0,6	0,35	184	2197	263,6	1,7	0,92
F2A2	2,7	0,34	93	1589	123,0	1,1	3,17

¹⁾ Weitere Parameter der Filterkonfigurationen sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

²⁾ Widerstandskoeffizienten mit dem charakteristischen Korndurchmesser d_{15F}

Die Forchheimer-Koeffizienten a werden bei einer geringen Wellenhöhe von $H_{eq} = 3,8$ m ($Re^* \leq 1$) ermittelt, um einen Fließzustand mit sehr geringem turbulenten Anteil und einen geringen Einfluss aus der Materialverdichtung und anfänglichen Erosionsprozessen zu gewährleisten. Anschließend werden bei einer Wellenhöhe von $H_{eq} = 6,4$ m ($Re^* \geq 1$) die Forchheimer-Koeffizienten b durch Regressionsanalyse mit der Forchheimer-Gleichung und dem zuvor ermittelten Koeffizienten a bestimmt (siehe Tabelle 6.3). Die Filterkonfiguration F2A1 wird nicht zur Ermittlung der Forchheimer-Koeffizienten a und b verwendet, da kein stabiler Zustand erreicht wird.

Das Strömungsregime zur Ermittlung der Forchheimer-Koeffizienten b liegt in dieser Studie nach Dybbs und Edwards (1984), Bear und Corapcioglu (1984), Burcharth und Andersen (1995), Pedras und Lemos (2001) im Übergangsbereich zwischen Darcy- und Forchheimer-Strömungsregimes mit Reynolds-Zahlen im Bereich $Re^* = 0,92$ bis 4,61 (siehe Tabelle 6.3). Der Übergangsbereich des Strömungsregimes ist durch Trägheitskräfte bestimmt und ist im Bereich von $1 < Re < 150$ definiert (siehe Abschnitt 2.1.4). Der nichtlineare Zusammenhang zwischen hydraulischem Gradienten und Fließgeschwindigkeit entsteht durch die Grenzschichtausbildung der Porenwasserströmung (siehe Abschnitt 2.2.3).









Die Filtermaterialien F1A2, F1A3 bestehen aus sehr ähnlichem Material (siehe Tabelle 3.3) und erreichen daher eine sehr gute Übereinstimmung des Widerstandskoeffizienten α . Durch anfängliche Materialumlagerung, Verdichtung und geringerer Ungleichförmigkeit des Filtermaterials wird bei F1A2 ein höherer Widerstandskoeffizient $\beta = 3,0$ im Vergleich zu F1A3 ($\beta = 0,7$) erreicht. Die Widerstandskoeffizienten β der Filterkonfigurationen F1B1 und F2A2 befinden sich (für den charakteristischen Korndurchmesser $d_c = d_{15F}$) ebenfalls innerhalb des Bereichs von $\beta = 0,7$ bis 3,0.

Eine Ausnahme bildet das enggestufte Material F1C1 mit wesentlich höheren Widerstandskoeffizienten α im Vergleich der Filterkonfigurationen. Das Filtermaterial F1C1 besteht aus einem enggestuften rundkörnigen Material (siehe Tabelle 3.3). Die Ermittlung der Widerstandskoeffizienten unterliegt dabei der Unsicherheit bei der Ermittlung der Porosität in Abhängigkeit der Ungleichförmigkeit und der Lagerungsdichte. Infolge der dynamischen Änderung des Porenwasserdrucks erfährt die Probe eine Verdichtung, sodass mit steigender Versuchsdauer die Lagerungsdichte zunimmt und die Porosität sowie der Forchheimer-Koeffizient a abnehmen. Bei einer Zunahme der Porosität von $n = 0,30$ auf 0,35 nimmt der Widerstandskoeffizient um rund 54 % von $\alpha = 263,6$ auf $\alpha = 143,1$ ab. Damit ist die Porosität ein sehr sensibler Parameter und führt neben dem charakteristischen Korndurchmesser d_c zu den größten Unsicherheiten in Bezug auf die Widerstandskoeffizienten α und β .

Die Ermittlung der Forchheimer-Koeffizienten kann im Vergleich mit den in der Literatur angegebenen Werten nur für den stabilen Zustand des Filters erfolgen. Für den instabilen Filterzustand kann der Fließwiderstand nicht mit der Forchheimer-Gleichung beschrieben werden und die Änderung der Forchheimer-Koeffizienten weisen auf Infiltration, Kontakterosion und Suffosion hin (Abschnitt 5.1). Die Forchheimer-Koeffizienten a und b aus Tabelle 6.3 werden den Ansätzen aus der Literatur mit den Widerstandskoeffizienten der laminaren Strömungskomponente α und der turbulenten Strömungskomponente β gegenübergestellt. Die Ermittlung der Widerstandskoeffizienten erfolgt auf der Grundlage des Ansatzes nach Beyer und Schweiger (1969) zur Ermittlung der Porosität n in Abhängigkeit der Ungleichförmigkeit U mit der Annahme einer mittleren natürlichen Lagerungsdichte (siehe Abschnitt 2.1.4).

Die Widerstandskoeffizienten α wird mit Gleichung 2.23 und der Widerstandskoeffizient β mit Gleichung 2.24 ermittelt (siehe Abschnitt 2.2.3). Die Widerstandskoeffizienten α und β werden auf der Grundlage der charakteristischen Korndurchmesser d_c und der kornbezogenen Reynolds-Zahl Re^* in Tabelle 6.4 gegenübergestellt.

Tab. 6.4: Vergleich der Widerstandskoeffizienten α und β unter Berücksichtigung der verschiedenen charakteristischen Korndurchmessers d_c (siehe auch Tabelle 2.4)

Studie	d_c	Strö-	Widerstandskoeffizient				Reynolds-Zahl Re^*
			α	α	β	β	
Ergun (1952)	d_{50}		150	150	1,8	1,8	1 - 1000 ¹⁾
Engelund (1953)	d_{50}		780	1500	1,8	3,6	22 - 152 ²⁾
den Adel (1987)	d_{15}		75	350	0,9	5,3	8 - 4165 ²⁾
Shih (1991)	d_{15}		780	1500	1,8	3,6	300 - 5700 ²⁾
Van Gent (1993)	d_{50}		1000	1000	1,1	1,1	746 - 22807 ³⁾
Andersen et al., 1992	d_{eq}		2120	3700	0,5	1,1	746 - 22807 ³⁾
Muttray, 2000	d_{50}		305	305	1,3	1,3	$(1,4 - 2,7 \cdot 10^5)^{1)}$
Diese Studie ⁴⁾	d_{15}		43	264	0,7	3,0	0,9 - 4,6 ²⁾
	d_{50}		417	2544	2,1	9,3	

¹⁾ Re^* bezogen auf den Korndurchmesser d_{50}

²⁾ Re^* bezogen auf den Korndurchmesser d_{10}

³⁾ Re^* bezogen auf den Korndurchmesser d_{15}

⁴⁾ Die Widerstandskoeffizienten beziehen sich auf eine Wellenhöhe $H_{eq} = 6,4$ m mit einer Wellenperiode $T_{eq} = 9,52$ s in einer Wassertiefe $h_{eq} = 25,8$ m (kinematische Viskosität $\nu = 1,0 \cdot 10^{-6}$ m²/s bei 20 °C)

Der Vergleich der Widerstandskoeffizienten α und β aus der Literatur mit den erzielten Ergebnissen zeigt relativ große Bandbreiten. Die wichtigsten Unterschiede der Untersuchungen liegen dabei in folgenden Aspekten:

- **Strömungsregime** (gleichgerichtete (stationäre), oszillierende (instationäre) Strömung)
- **Strömungsrichtung** (vertikale/horizontale, Durchströmung parallel/in Reihe)
- **Fluideigenschaften** (Viskosität/Temperatur, Sättigungsgrad, Kompressibilität)
- **Porengeometrie** (Kornform, Kornverteilung, Porosität, Lagerungsdichte)
- **Bodenspannungen** (Auflast, Porenwasserdruck)

a) Strömungsregime und Strömungsrichtung: Die Widerstandskoeffizienten in Tabelle 6.4 wurden nach Ergun (1952), Engelund (1953) und Adel (1987) zu gleichgerichteter Strömung durchgeführt. Der Einfluss der oszillierenden Strömung und des rundkörnigen weitgestuften Materials auf die Widerstandskoeffizienten α und β bleiben hierbei unberücksichtigt.

Die Untersuchungen nach Smith (1991) und van Gent (1992, 1993) wurden unter horizontaler schichtparalleler oszillierender Durchströmung untersucht und zeigen den zusätzlichen Fließwiderstand bei wechselnder Richtung der welleninduzierten Strömungen. In dieser Studie zeigt sich ebenfalls ein höherer Widerstandskoeffizient β im Vergleich von oszillierender zu gleichgerichteter Strömung.

Die Widerstandskoeffizienten in Tabelle 6.4 sind für verschiedene Strömungsregime (im Darcy-Forchheimer-Strömungsregime bis zum vollständig turbulenten Strömungsregime) ermittelt worden. Ein Vergleich der Ergebnisse dieser Studie ist daher im Bereich geringer Reynolds-Zahlen $Re^* < 10$ sinnvoll. Im Laborexperiment wurden kornbezogene Reynolds-Zahlen im Bereich von $Re^* = 0,9$ bis 4,6 mit der maximalen Filtergeschwindigkeit $v_{f,max}$ zum Zeitpunkt des Wellenbergs und des Wellentals erreicht, sodass Re^* bis zum Richtungswechsel der Filtergeschwindigkeit abnimmt. Dies hat eine Änderung des Strömungsregimes vom Darcy-Forchheimer-Regime zum Darcy-Regime zur Folge (siehe Abschnitt 2.1.5 und 2.2.3).

b) Fluideigenschaften: Das Porenwasser wird in den meisten Untersuchungen auf Wasser mit einer kinematischen Viskosität von $\nu = 1,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (bei 15°C) bezogen, während die Experimente dieser Studie im Labor bei 20°C und damit bei einer kinematischen Viskosität $\nu = 1,00 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ durchgeführt werden. Bei einer Änderung der Temperatur von 20°C auf 15°C ergibt sich eine Abnahme des Widerstandskoeffizienten α um rund 12 % (Abschnitt 2.2.3). Die Kompressibilität des Porenfluids und der Sättigungsgrad haben einen großen Einfluss auf den Fließwiderstand, jedoch sind diese Parameter abhängig vom Porenwasserdruck und unterliegen großen Unsicherheiten in Laborexperimenten.

c) Porengeometrie und Bodenspannungen: Der Fließwiderstand eines weitgestuften Materials kann näherungsweise mit dem charakteristischen Korndurchmesser d_c und der Porosität n erfasst werden. Weitere Parameter zur Beschreibung der Porenstruktur werden nach Adel (1987) für weitgestuftes Filtermaterial erforderlich und Shih (1991) empfiehlt dazu die Ermittlung des charakteristischen Korndurchmessers unter Einbeziehung der Korndurchmesser d_{15} , d_{50} und d_{85} in Gleichung 2.25. Nach Dudgeon (1966), Andersen et al. (1992) und Burcharth und Andersen (1995) nehmen die Widerstandskoeffizienten α bei weitgestuftem rundkörnigem Material gegenüber gleichförmigen Kugelpackungen zu. Ebenfalls werden höhere Widerstandskoeffizienten β bei weitgestuftem Material gegenüber gleichförmigen Kugelpackungen festgestellt. Nach Shih (1991) nimmt der Widerstandskoeffizient α mit steigendem Korndurchmesser d_{15} zu und β nimmt mit steigendem Korndurchmesser ab.

Ein weiterer Einfluss der Widerstandskoeffizienten liegt in der Totalspannung, die durch die Auflast der Probe und den (absoluten) Porenwasserdruck bestimmt wird. Bei einer Zunahme der Auflast und einer

Abnahme des Porenwasserdrucks ergibt sich durch die elastische und plastische Verformung (Verdichtung) der Bodenmatrix eine Erhöhung der Widerstandskoeffizienten α und β . Bei Entlastung und Erhöhung des Porenwasserdrucks entsteht eine Abnahme des Widerstandskoeffizienten α und β .

Es werden in dieser Studie die besten Übereinstimmungen der Widerstandskoeffizienten α und β mit dem Ansatz nach Adel (1987) erreicht, da die Untersuchungen ebenfalls im Übergangsbereich des Darcy-Forchheimer-Strömungsregimes ($Re \leq 8$) mit feinkörnigem Material durchgeführt wurden. Bisher ist jedoch kein direkter Vergleich dieser Studie mit bestehenden Untersuchungsergebnissen möglich, da weitgestuftes rundkörniges Material unter vertikal oszillierender Durchströmung zu folgenden Bedingungen untersucht wurde:

- Welleninduzierte Strömung (äquivalente Wellenhöhe $H_{eq} = 6,4$ m, äquivalente Wassertiefe $h_{eq} = 25$ m, Wellenperiode $T_{eq} = 9,52$ s)
- Vertikal oszillierende Durchströmung eines Filtermaterials im Übergangsbereich des Darcy-Forchheimer-Strömungsregimes mit $Re = 0,9$ bis $4,6$ (mit dem charakteristischen Korndurchmesser $d_c = d_{15F}$)
- Weitgestuftes Filtermaterial: $U_F = d_{60F}/d_{10F} = 2,3$ bis $6,6$; $d_{15F} = 0,6$ bis $5,4$ mm auf einem Basismaterial $U_B = 1,3$; $d_{15B} = 0,2$ mm

Die Ermittlung der Koeffizienten des Fließwiderstands unterliegen dem Einfluss der Steuerung der Wechseldurchströmungsanlage (siehe Abschnitt 3.3.5). Die untere Randbedingung führt zu einem relativ hohen hydraulischen Gradienten, da die Dämpfung des Porenwasserdrucks durch die Schichtdicke der Basisschicht begrenzt ist. Eine weitere Unsicherheit in der Ermittlung der Parameter liegt in der elasto-plastischen Verformung der Porengeometrie infolge des dynamischen Porenwasserdruck. Die durchströmte Porengeometrie erfährt durch die elasto-plastische Verformung eine Volumenänderung über den Verlauf einer Wellenperiode wodurch die Porosität in den Ansätzen zur Ermittlung der Widerstandskoeffizienten nicht konstant bleibt. Die Ermittlung der Widerstandskoeffizienten unterliegt damit Unsicherheiten durch den Einfluss der Porosität n und des charakteristischen Korndurchmessers d_c der Porengeometrie.

Für die Simulation von Strömungen in Kornfiltern bestehend aus weitgestuften Sand-Kies-Gemischen bedarf es besonderer Beachtung der Forchheimer-Widerstandskoeffizienten α und β . Bei der Beschreibung des Fließwiderstands der Porenwasserströmung ergibt sich eine Steigerung des Forchheimer-Koeffizienten α aufgrund der Parallelschaltung der Basis- und Filterschicht, da die Filtergeschwindigkeit durch die Basisschicht mit relativ geringer Durchlässigkeit bestimmt wird. Der Vergleich der Ergebnisse dieser Studie mit den Ansätzen der Literatur (Tabelle 6.4) zeigt weiterhin die Abhängigkeit der untersuchten Porenstruktur des porösen Mediums von den folgenden Eigenschaften:

- (i) dem Einzelkorn (Kornform),
- (ii) der Bodenmatrix (Kornverteilung, Porosität und Lagerungsdichte) sowie
- (iii) der effektiven Bodenspannungen (Auflast, Porenwasserdruck).

Die Wahl eines geeigneten Ansatzes führt unter Berücksichtigung der Strömungsbedingungen und Materialeigenschaften des porösen Mediums zu einer guten Abschätzung des Fließwiderstands. Hierdurch kann die Strömung in Filteraufbauten und der maßgebende hydraulische Gradient an der Schichtgrenze zur Bemessung von Kornfiltern ermittelt werden.

Zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens eines semi-stabilen Filters bedarf es einer Erweiterung der bisherigen Ansätze um eine zeitlich veränderliche Porengeometrie unter Berücksichtigung der Kornverteilung, Porosität und Lagerungsdichte.

6.3 Zusammenfassung und Bewertung der geohydraulischen Prozesse

Die hydraulischen Prozesse im Filteraufbau unter welleninduzierter Strömung werden für die hydraulische Bemessung von Kornfiltern untersucht. Neben der Kenntnis über den Widerstand des Filters (Abschnitt 5.3) ist das Verständnis über die hydraulische Einwirkung durch den (welleninduzierten) hydraulischen Gradienten (Abschnitt 6.1) und der (welleninduzierten) Filtergeschwindigkeit (Abschnitt 6.2.1) erforderlich. Die wichtigsten Ergebnisse des für die Filterbemessung maßgebenden hydraulischen Gradienten sind in Abschnitt 6.3.1 zusammengefasst und bewertet. Anschließend erfolgt die Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse zur Filtergeschwindigkeit und zum Fließwiderstand in Abschnitt 6.3.2. Dazu werden die Modelleffekte sowie die Anwendbarkeit und die Einschränkungen der Ergebnisse dieser Studie in Abschnitt 6.3.3 diskutiert.

6.3.1 Welleninduzierter maßgebender hydraulischer Gradient

Dem Widerstand von Kornfiltern gegen Kontakterosion steht die Einwirkung aus hydraulischem Gradienten und Filtergeschwindigkeit gegenüber. Zur Herleitung von Berechnungsformeln zur hydraulischen Bemessung von Kornfiltern unter Welleneinwirkung wird der Zusammenhang zwischen den Wellenparametern (Wellenhöhe H und Wellenperiode T in Wassertiefe h) und dem (maßgebenden) maximalen hydraulischen Gradienten unterhalb der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filterschicht nach linearer Wellentheorie hergestellt (Abschnitt 2.2.1). Hierzu werden folgende hydraulische Prozesse untersucht:

- *Verteilung des Porenwasserdrucks im Filteraufbau (Abschnitt 6.1.1):* die Verteilung des totalen und des dynamischen Porenwasserdrucks im Filter- und Basismaterial geben Aufschluss über die Lokation des maximalen hydraulischen Gradienten im Basismaterial unterhalb der Schichtgrenze zum Filter. Die Filterstabilität wird daher anhand des hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ zwischen der Schichtgrenze (Level 5) und 10 cm unterhalb im Basismaterial (Level 6) bewertet.
- *Zeitreihe des hydraulischen Gradienten (Abschnitt 6.1.2):* der zeitliche Verlauf des hydraulischen Gradienten zeigt, dass der größte Anteil des Druckhöhenunterschieds Δh unterhalb der Schichtgrenze entsteht. Durch die Zeitreihenanalyse des hydraulischen Gradienten $i_{(6,5)}$ werden die Maximalwerte zum Wellenberg und Wellental als $i_{\max(6,5)}$ ermittelt.
- *Transmission und Dissipation des dynamischen Wellendrucks (Abschnitt 6.1.3):* die Untersuchung der Transmission des dynamischen Porenwasserdrucks von der Oberkante des Filters (Level 1) bis zum unteren Rand des Basismaterials (Level 9) zeigt einen geringen Einfluss der Phasenverschiebung zwischen den Porenwasserdruckverläufen (in Level 1 und 9) und einen relativ hohen Einfluss der unteren Randbedingung auf den hydraulischen Gradienten $i_{(6,5)}$ im Laborexperiment. Aufgrund der Begrenzung der Schichtdicke der Basisschicht auf $SD_B = 0,40$ m im Laborexperiment werden weitere Untersuchungen mit dem validierten numerischen Modell mit einer ausreichend großen Schichtdicke der Basisschicht zur Modellbildung der hydraulischen Filterstabilität (in Abschnitt 7.1) erforderlich.
- *Welleninduzierter hydraulischer Gradient (Abschnitt 6.1.4):* die Ergebnisse der Laborexperimente zeigen einen sehr guten funktionalen Zusammenhang im stabilen Filterzustand zwischen den Wellenparametern $H/(h \cdot L)^{0,5}$ und dem hydraulischen Gradienten unterhalb der Schichtgrenze $i_{\max(6,5)}$.

6.3.2 Welleninduzierte Porenwasserströmung und Fließwiderstand im Filteraufbau

Die Analyse der Fließwiderstände im Laborexperiment liefert einen Beitrag zu den Widerstandskoeffizienten für die numerische Modellierung von Strömungen in porösen Medien. In den Untersuchungen dieser Studie werden geringe Filtergeschwindigkeiten im stabilen Filterzustand erreicht, sodass geringe kornbezogene Reynolds-Zahlen im Darcy-Strömungsregime vorliegen. In Bezug auf Basismaterialien höherer Durchlässigkeit geht die Porenwasserströmung bei höheren Filtergeschwindigkeiten in das Darcy-Forchheimer-Strömungsregime über. Für diesen Bereich wurden die Widerstandskoeffizienten der Forchheimer-Gleichung durch Regressionsanalyse für oszillierende Strömung in weitgestuften Filtermaterialien (Sand-Kies-Gemische) ermittelt (siehe Abschnitt 6.2.2):

- Widerstandskoeffizient des laminaren Terms (nach Gleichung 2.23 mit $d_c = d_{15F}$):
 $\alpha = 43$ bis 264
- Widerstandskoeffizient des turbulenten Terms (nach Gleichung 2.24 mit $d_c = d_{15F}$):
 $\beta = 0,7$ bis $2,1$

Die Ergebnisse dienen zur Einordnung des untersuchten Strömungsregimes im Filteraufbau dieser Studie und zur Kalibrierung numerischer Modelle. Bei dem Vergleich dieser Ergebnisse mit der Literatur sind folgende Hauptcharakteristiken der Untersuchungen zu unterscheiden:

- Strömungsregime und Strömungsrichtung
- Fluideigenschaften des Porenwassers und Sättigungsgrad
- Porengeometrie und Bodenspannungen

Es wurde die beste Übereinstimmung der Widerstandskoeffizienten aus dieser Studie mit dem Ansatz nach den Adel (1987) aufgrund des ähnlichen Strömungsregimes festgestellt (siehe Tabelle 6.4), wenn gleich die Untersuchung nach den Adel (1987) mit gleichgerichteter Strömung durchgeführt wurden.

6.3.3 Modelleffekte, Anwendbarkeit und Einschränkungen

Hydraulische Randbedingungen: Die Porenwasserdruckverteilung ergibt sich durch die gesteuerten Randbedingungen in der Wechseldurchströmungsanlage, wodurch Abweichungen der Anlagensteuerung von der vorgegebenen Druckrandbedingung in der Zeitreihe des Porenwasserdrucks festgestellt werden können. Die Abweichungen von der sinusförmigen Zeitreihe werden sichtbar zum Zeitpunkt eines Wellenbergs und Wellentals in Form eines Plateaus (Abschnitt 4.5.2 und 6.1.2). Durch die Dämpfung des dynamischen Porenwasserdrucks innerhalb der Probe nimmt dieser Effekt zur Schichtgrenze zwischen Basis- und Filterschicht ab und wird vernachlässigbar gering. Die untere Randbedingung (unterhalb der Basisschicht) wird auf den konstanten hydrostatischen Druck geregelt. Mit zunehmender Druckamplitude der oberen Randbedingung (oberhalb der Filterschicht) nimmt der dynamische Druckanteil am unteren Rand zu, da die Regelung der Versuchsanlage zeitverzögert reagiert. Hierdurch entsteht eine Phasenverschiebung zwischen der oberen und unteren Druckrandbedingung sowie eine relativ hohe Druckdämpfung der unteren Randbedingung im Vergleich zu einer natürlichen Dämpfung im Basismaterial. Hierdurch wird der hydraulische Gradient $i_{6,5}$ an der Schichtgrenze überschätzt (Abschnitt 6.1.3).

Strömungsregime: Die Ermittlung der Forchheimer-Koeffizienten wird für die verschiedenen Filterkonfigurationen in Abhängigkeit des gleichen Basismaterials durchgeführt. Aufgrund der Parallelschaltung der beiden Bodenschichten wurden die Forchheimer-Koeffizienten unter dem Einfluss der angrenzenden Basisschicht bestimmt. Damit sind die dargestellten Widerstandskoeffizienten der Forchheimer-

Gleichung anwendbar für vergleichbare Materialkombinationen bestehend aus dem verwendeten Basismaterial (Mittelsand mS) und dem jeweiligen Filtermaterial (Grobsand gS bis Mittelkies mG).

Fließwiderstand: Die Forchheimer-Koeffizienten a und b der gesamten Probe (Basis-/ Filtermaterial) werden mit dem hydraulischen Gradienten $i_{1,9}$ zwischen der Oberkante der Filterschicht und der Unterkante der Basisschicht ermittelt. Ab dem Bewegungsbeginn wird die Filtergeschwindigkeit v_f durch die Reduzierung der äquivalenten Durchlässigkeit der gesamten Probe reduziert. Weiterhin wird die Durchlässigkeit im Filter an der Schichtgrenze zum Basismaterial durch Infiltration des Basismaterials geringer, wodurch sich die Randbedingungen des Porenwasserdrucks für die Filter und Basisschicht jeweils an der Schichtgrenze ändern. Die Verschiebung der Schichtgrenze durch Einsinken des Filters führt weiterhin zu einer Verschiebung der oberen Randbedingung sowie zur Abnahme der Schichtdicke der Basis. Die Analyse dieser geohydraulischen Prozesse und die Auswirkungen auf die hydraulischen Prozesse sind in Abschnitt 5.1.3 beschrieben. Bei einer Abnahme des Sättigungsgrads nimmt der hydraulische Gradient $i_{6,5}$ innerhalb der Probe durch die steigende Dämpfung des Porenwasserdrucks ab und die Filtergeschwindigkeit $v_{f,max}$ nimmt bei unveränderten Druckrandbedingungen zu. Damit steigt die Reynolds-Zahl Re^* der Porenwasserströmung im Laborversuch an und führt zu größeren Fließwiderständen.

Der Porenwasserdruck und die Filtergeschwindigkeit unterliegen den Modelleffekten der Versuchsanlage. Durch die Regelung der unteren Randbedingung im Laborexperiment entsteht eine Überschätzung des hydraulischen Gradienten. Zur Herleitung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Wellenparametern (Wellenhöhe H , Wellenperiode T in Wassertiefe h) und dem hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze sind daher die Ergebnisse des validierten numerischen Modells ergänzend zu den Laborexperimenten besonders hilfreich. Dieser Zusammenhang dient in Verbindung mit den Ergebnissen zur Filterstabilität aus den Laborexperimenten zur Herleitung von hydraulischen Stabilitätskriterien in Abhängigkeit des kritischen hydraulischen Gradienten.

7 Modellbildung und hydraulische Stabilitätskriterien

In Hinblick auf die Modellbildung der hydraulischen Filterstabilität von Kornfiltern werden die bodendynamischen Prozesse (Kapitel 5) mit den kritischen hydraulischen Parametern und die geohydraulischen Prozesse (Kapitel 6) mit den welleninduzierten hydraulischen Parametern in diesem Kapitel zusammengeführt. Mit der Kenntnis dieser Prozesse wird die Modellbildung für die geohydraulischen Stabilitätskriterien beschrieben. Hierzu bedarf es einer Definition des Bewegungsbeginns und der Filterstabilitätszustände sowie der zugehörigen kritischen hydraulischen Parameter in Abhängigkeit der geotechnischen Eigenschaften des Filtermaterials. Die hydraulische Stabilität wird unter regelmäßiger oszillierender Strömung in vertikaler Richtung lotrecht zur Schichtgrenze betrachtet.

Die Modellbildung der maßgebenden Prozesse zur Filterstabilität von Kornfiltern in Sohlsicherungen werden zum welleninduzierten hydraulischen Gradienten i_{\max} und zum kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} in Abschnitt 7.1 mit dem Ziel der hydraulischen Filterbemessung in Abschnitt 7.2 beschrieben (Abbildung 7.1).

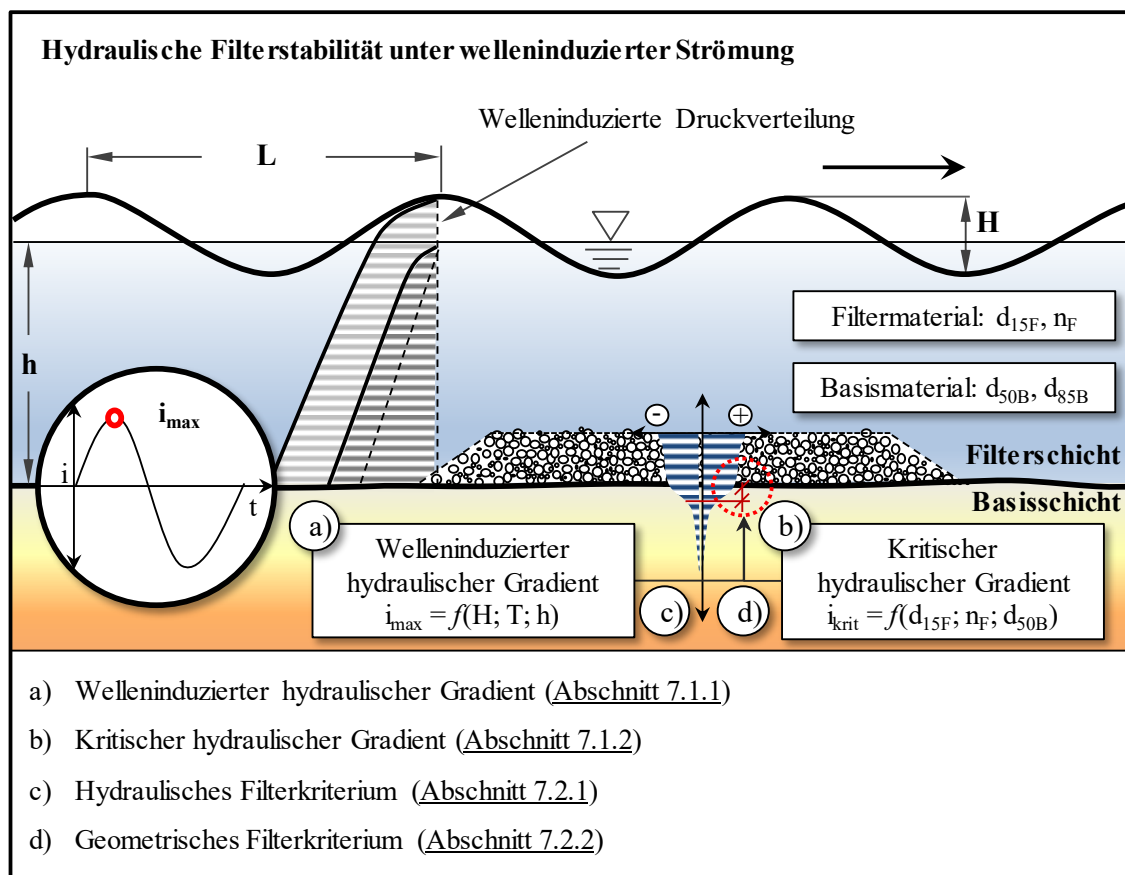


Abb. 7.1: Zusammenführung der Ergebnisse zur Modellbildung der hydraulischen Filterstabilität unter welleninduzierter Strömung orthogonal zur Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial

Die Modellbildung und die Herleitung von Bemessungsformeln werden in diesem Kapitel beschrieben, sodass die hydraulischen und geometrischen Bemessungskriterien unter Welleneinwirkung an einem vollständigen Bemessungsbeispiel gezeigt werden können. Weiterhin ist es das Ziel, Empfehlungen für die Ermittlung der Wellenparameter und geotechnischen Parameter des Basis- und Filtermaterials sowie für die Anwendung der Bemessungsformeln zu erarbeiten.

- *Modellbildung (Abschnitt 7.1): (i) Ergebnisse der numerischen Untersuchungen:* Zur Modellbildung wird der funktionale Zusammenhang zwischen dem maßgebenden hydraulischen Gradienten i_{\max} an der Schichtgrenze und den Wellenparametern (Wellenhöhe H , Wellenperiode T und Wassertiefe h) durch die numerische Parameterstudie hergeleitet.
(ii) *Ergebnisse der Laborexperimente:* Weiterhin wird der Grenzzustand der hydraulischen Filterstabilität unter der Einwirkung welleninduzierter Strömung mit dem kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} aus den Laborexperimenten analysiert. Es wird die Ermittlung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Abstandsverhältnis A (u. a. d_{15F}/d_{50B}), Porosität n_F (in Abhängigkeit der Lagerungsdichte D_F und der Ungleichförmigkeit U_F des Filtermaterials) und dem kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} beschrieben.
- *Hydraulische Filterbemessung (Abschnitt 7.2):* Die hydraulische Filterbemessung wird anhand der hergeleiteten Formeln und Diagramme beschrieben und diskutiert. Die Anwendung der hydraulischen Stabilitätskriterien wird mit einem Bemessungsbeispiel verdeutlicht und es werden Empfehlungen für die Bemessung zusammengefasst.
- *Modelleffekte und Einschränkungen (Abschnitt 7.3):* Die wichtigsten Ergebnisse der Modellbildung werden mit einer Diskussion der Modelleffekte und Einschränkungen (aus den Abschnitten 7.1 und 7.2) zusammengefasst und im Hinblick auf deren Anwendung in der Baupraxis und den weiteren Forschungsbedarf diskutiert.

7.1 Modellbildung zur hydraulischen Filterstabilität

Die kritischen hydraulischen Parameter der untersuchten Filtermaterialien sind in Abschnitt 5.3 beschrieben und diskutiert worden. In diesem Abschnitt wird die Einwirkung aus welleninduzierter Strömung, beschrieben durch den hydraulischen Gradienten i_{\max} an der Schichtgrenze (Basis-/Filtermaterial), in den Zusammenhang mit dem Widerstand des Kornfilters gegen Kontakterosion gebracht. Dieser Widerstand wird durch den kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} beschrieben. Das Vorgehen zur Modellbildung der hydraulischen Filterstabilität, das heißt zur Bestimmung des Grenzzustands $i_{\max} \leq i_{\text{krit}}$ (vor Bewegungsbeginn durch Kontakterosion), ist in Abbildung 7.2 dargestellt. Hierbei werden i_{\max} und i_{krit} wie folgt ermittelt:

- *Maßgebender hydraulischer Gradient i_{\max}* : Der maßgebende hydraulische Gradient an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial i_{\max} wird mit den üblichen Ansätzen der linearen Wellentheorie als Funktion der lokalen Wellenparameter (Wellenhöhe H , Wellenperiode T in Wassertiefe h) und der Durchlässigkeit des Filtermaterials $k_{f,F}$ bestimmt (Abschnitt 7.1.1).
- *Kritischer hydraulischer Gradient i_{krit}* : Der kritische hydraulische Gradient i_{krit} wird als Funktion der Filtereigenschaften (Abstandsverhältnis A (d_{15F}/d_{50B} ; d_{15F}/d_{85B}) und Porosität n_F mit Ungleichförmigkeit U_F und Lagerungsdichte D_F) ermittelt (Abschnitt 7.1.2).

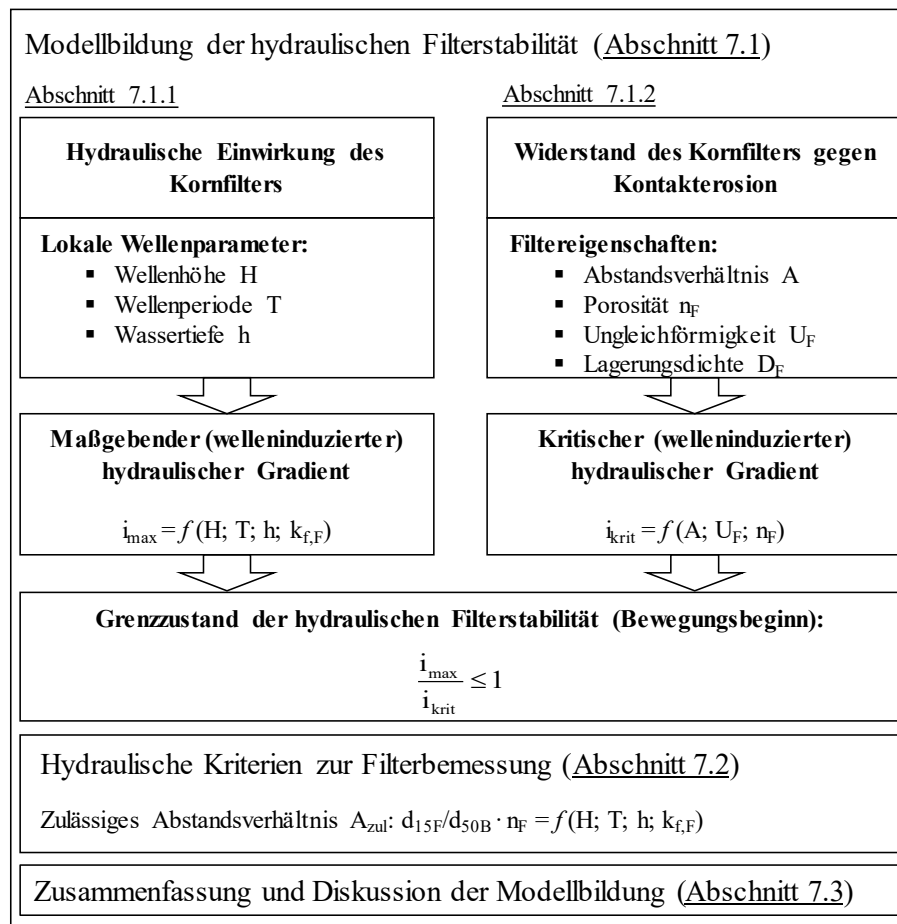


Abb. 7.2: Übersicht des methodischen Vorgehens zur hydraulischen Filterbemessung

7.1.1 Numerische Untersuchungen des maßgebenden hydraulischen Gradienten

Der welleninduzierte hydraulische Gradient an der Schichtgrenze (Basis-/Filtermaterial) i_{\max} ist maßgebend für die hydraulische Filterstabilität. Aus diesem Grund wird i_{\max} mit Hilfe des validierten numerischen Modells (Abschnitt 4.5) zur Herleitung von Bemessungsformeln unter dem Einfluss folgender Parameter systematisch untersucht:

- Wellenhöhe H
- Wellenperiode T
- Wassertiefe h
- Durchlässigkeit des Filtermaterials $k_{f,F}$

Das Versuchsprogramm der numerischen Parameterstudie, basierend auf dem kalibrierten und validierten numerischen Modell *geotechFoam*, ist in Abschnitt 4.6.2 dargestellt. Die numerischen Untersuchungen werden aufgrund der vorangegangenen Sensitivitätsanalysen (Abschnitt 4.6) mit den konstant gehaltenen Parametern nach Tabelle 7.1 durchgeführt:

Tab. 7.1: Parameter der numerischen Parameterstudie

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Durchlässigkeit des Basismaterials (Feinsand fS, $d_{10B} = 0,195$ mm)	$k_{f,B}$	$6,8 \cdot 10^{-4}$	m/s
Schichtdicke der Basisschicht	SD_B	3,00	m
Schichtdicke der Filterschicht	SD_F	0,40	m
Dichte des Porenfluids	ρ_w	1000	kg/m ³
Sättigungsgrad	S	99,5	%

Zur Analyse des welleninduzierten hydraulischen Gradienten wird die Wellenhöhe H als wichtigster Parameter zusammen mit der Wassertiefe h untersucht. Die Wellenhöhe H ist durch die Wassertiefe h begrenzt und erreicht das Maximum bei einem Brecherindex $H/h = 0,78$ (Abschnitt 2.2.1). Der Einfluss des Brecherindex H/h auf den hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ ist in Abbildung 7.3 für drei Filtermaterialien ((1) mit $k_{f,F(1)} = 2,00 \cdot 10^{-3}$ m/s, (2) mit $k_{f,F(2)} = 1,25 \cdot 10^{-3}$ m/s und (3) mit $k_{f,F(3)} = 5,00 \cdot 10^{-4}$ m/s) dargestellt.

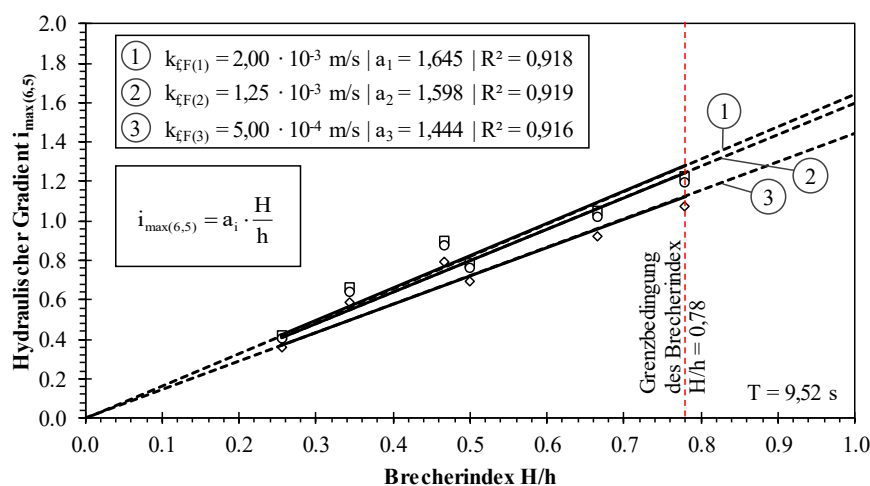


Abb. 7.3: Einfluss des Brecherindex H/h auf den hydraulischen Gradienten $i_{\max(5,6)}$ für drei Filtermaterialien mit verschiedenen Durchlässigkeitsbeiwerten $k_{f,F(i)}$

Mit steigendem Brecherindex H/h nimmt der hydraulische Gradient $i_{\max(6,5)}$ linear zu. Weiterhin nimmt die Steigung der Anpassungsfunktion mit zunehmender Durchlässigkeit des Filtermaterials $k_{f,F}$ zu. Der hydraulische Gradient $i_{\max(6,5)}$ kann nach Gleichung 7.1 annähernd ermittelt werden:

$$i_{\max(6,5)} = a_i \cdot \frac{H}{h} \quad (7.1)$$

mit:

- $i_{\max(6,5)}$: Maximaler hydraulischer Gradient an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial
 a_i : Proportionalitätsfaktor, abhängig von der Filterdurchlässigkeit $k_{f,F}$ und der Wellenperiode T
 H : Wellenhöhe in m
 h : Wasserstand in m

Gleichung 7.1 bezieht sich auf ein Basismaterial mit einer Durchlässigkeit von $k_{f,B} = 6,8 \cdot 10^{-4}$ m/s und einer Schichtdicke des Filters von $SD_F = 0,40$ m. Der Proportionalitätsfaktor a_i ist in Abhängigkeit der Filterdurchlässigkeit $k_{f,F}$ und Wellenperiode T in Tabelle 7.2 zusammengefasst.

Tab. 7.2: Proportionalitätsfaktor a_i in Gleichung 7.1 in Abhängigkeit der Wellenperiode und der Durchlässigkeit des Filters (für ein Basismaterial mit $k_{f,B} = 6,8 \cdot 10^{-4}$ m/s, $d_{50B} = 0,25$ mm und einer Filterschichtdicke $SD_F = 0,40$ m)

Proportionalitätsfaktor a_i für verschiedene Wellenperioden T und Durchlässigkeiten $k_{f,F}$						
Wellenperiode	Durchlässigkeitsbeiwert des Filtermaterials $k_{f,F}$					
	$k_{f,F(1)} = 2,00 \cdot 10^{-3}$ m/s		$k_{f,F(2)} = 1,25 \cdot 10^{-3}$ m/s		$k_{f,F(3)} = 5,00 \cdot 10^{-4}$ m/s	
T [s]	a_i	R^2	a_i	R^2	a_i	R^2
7.25	1,040	0,862	1,012	0,861	0,911	0,856
9.52	1,645	0,918	1,598	0,919	1,444	0,916
11.00	2,075	0,701	2,019	0,702	1,820	0,713
12.50	2,351	0,425	2,288	0,425	2,066	0,423

Mit zunehmender Wellenperiode T und zunehmender Durchlässigkeit des Filtermaterials $k_{f,F}$ nimmt auch der hydraulische Gradient $i_{\max(6,5)}$ zu. Der Determinationskoeffizient R^2 zeigt für die Wellenperiode $T = 7,25$ s und $9,52$ s eine gute Übereinstimmung ($R^2 = 0,856$ bis $0,916$). Die Güte der Anpassungsfunktion nimmt für $T = 11,00$ s und $12,50$ s ab und liegt jeweils im Bereich von $R^2 = 0,423$ bis $0,713$. Der Einfluss der Wellenlänge L beziehungsweise der Wellenperiode T wird durch Gleichung 7.1 nicht ausreichend erfasst, sodass weitere Analysen zur Modellbildung erforderlich werden. Hierzu ist der Einfluss der Wellenperiode T auf den hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ in Abbildung 7.4 am Beispiel der Wassertiefe $h = 15,0$ m und der Durchlässigkeit des Filtermaterials $k_{f,1} = 2,00 \cdot 10^{-3}$ m/s dargestellt.

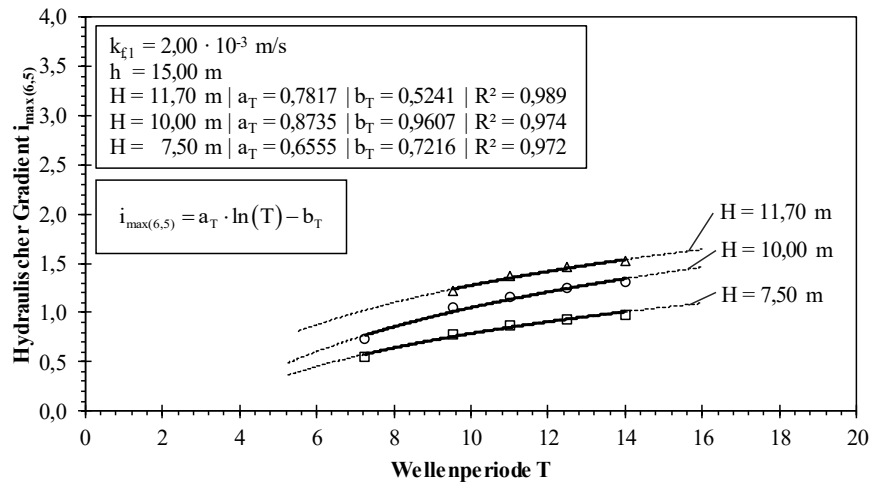


Abb. 7.4: Einfluss der Wellenperiode T auf den hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ (Simulation)

Der relativ große Einfluss der Wellenperiode T wird an Abbildung 7.4 bei gleichbleibendem Brecherindex H/h deutlich. Bei einer Zunahme der Wellenperiode von $T = 9,52$ s auf $14,00$ s (um 47 %) nimmt der hydraulische Gradient $i_{\max(6,5)}$ um 25 % zu. Somit erzeugt eine abnehmende relative Wassertiefe h/L einen steigenden hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze (Basis-/Filtermaterial). Der Zusammenhang zwischen dem Brecherindex H/h und dem hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ wird daher um die Wellenlänge L als Funktion der Wellenperiode T unter Berücksichtigung des dynamischen Druckanteils nach Gleichung 2.15 erweitert. In Abbildung 7.5 ist der Einfluss des einwirkenden Gradienten I' (an der Oberkante des Filters) auf den maximalen hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze $i_{\max(6,5)}$ in Abhängigkeit der maßgebenden Wellenparameter (Wellenhöhe H und Wellenlänge L in Wassertiefe h) dargestellt.

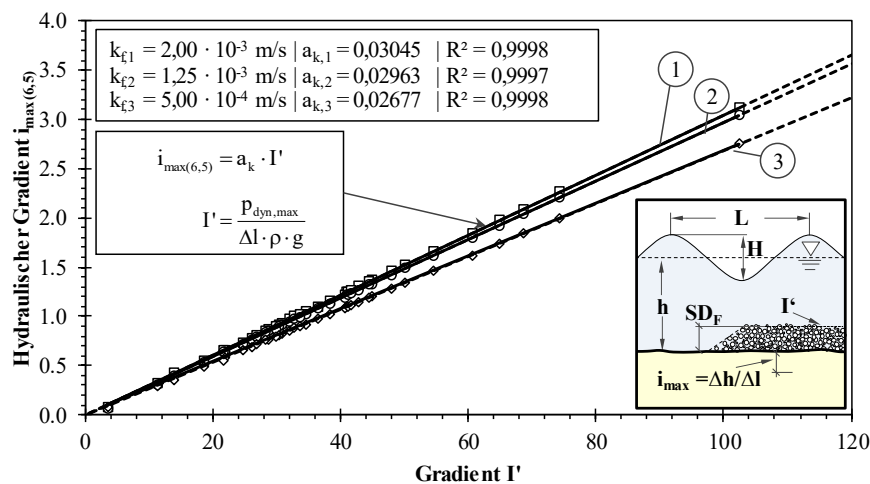


Abb. 7.5: Einfluss des einwirkenden Gradienten I' auf den maximalen hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial

Der hydraulische Gradient an der Schichtgrenze $i_{\max(6,5)}$ ergibt sich im einfachen Modell durch den dynamischen Druck (siehe Abschnitt 2.2.1) unter dem Einfluss der Wellenhöhe H , der Wellenlänge L (als Funktion der Wellenperiode T nach Gleichung 2.11) und der Wassertiefe h . In Abbildung 7.5 ist der Zusammenhang zwischen den Wellenparametern und dem hydraulischen Gradienten mit den Anpassungsfunktionen in Abhängigkeit der Durchlässigkeit des Filtermaterials k_{fF} dargestellt. Mit zunehmenden

der Durchlässigkeit $k_{f,F}$ nimmt der hydraulische Gradient $i_{\max(6,5)}$ zu, da die Transmission des dynamischen Porenwasserdrucks im Filter zunimmt. Die Anpassungsfunktionen beschreiben diesen Zusammenhang mit einem sehr hohen Bestimmtheitsmaß ($R^2 \geq 0,99$), da die Randbedingungen des Modells mit dem dynamischen Druck (Gleichung 2.15) nach linearer Wellentheorie definiert sind und die Druckverteilung nach Darcy modelliert wird.

Der funktionale Zusammenhang zwischen den Wellenparametern und dem maximalen hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ kann nach linearer Wellentheorie (Abschnitt 2.2.1) für die hydraulische Bemessung von Kornfiltern unter welleninduzierter Strömung mit Gleichung 7.2 beschrieben werden:

$$i_{\max(6,5)} = a_k \cdot I' \quad (7.2)$$

mit:

$$I' = \frac{p_{\text{dyn,max}}}{\Delta l \cdot \rho \cdot g} \quad (7.3)$$

$$p_{\text{dyn,max}} = \rho \cdot g \cdot \frac{H}{2} \cdot \frac{\cosh\left(\frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot SD_F\right)}{\cosh\left(\frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot h\right)} \quad (7.4)$$

mit:

- $i_{\max(6,5)}$: Maximaler hydraulischer Gradient (unterhalb der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial)
- a_k : Koeffizient der Filterdurchlässigkeit
- I' : Einwirkender Gradient an der Oberkante des Filters
- $p_{\text{dyn,max}}$: Maximaler dynamischen Wellendruck in N/m²
- Δl : Betrachteter Sickerweg unterhalb der Schichtgrenze in m (hier: $\Delta s = 0,1$ m)
- ρ : Rohdichte des Wassers kg/m³ (hier: 1000 kg/m³)
- g : Erdbeschleunigung in m/s²
- H : Wellenhöhe in m
- L : Wellenlänge in m
- SD_F : Schichtdicke des Filters in m
- h : Wassertiefe in m

Der Druckgradient wird nach linearer Wellentheorie ermittelt und als Randbedingung im Modell vorgegeben. Hierbei wird der hydraulische Gradient $i = \Delta h / \Delta l$ auf den Sickerweg $\Delta l = 0,10$ m unterhalb der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filterschicht bezogen, da die Druckmessung in der Wechseldurchströmungsanlage an gleicher Position und mit gleichem Abstand erfolgt. Mit Gleichung 7.3 kann der hydraulische Gradient $i_{\max(6,5)}$ für beliebige Sickerwege Δl ermittelt werden.

Da die Schichtdicke der Filterschicht SD_F im Verhältnis zur Wellenlänge L relativ gering ist und damit die Kosinus Hyperbolicus Funktion bei kleinen Schichtdicken SD_F gegen $\cosh(k \cdot SD_F) \rightarrow 1$ strebt kann Gleichung 7.2 mit dem dynamischen Wellendruck an der Sohle nach Gleichung 7.3 und 7.4 wie folgt vereinfacht werden:

$$i_{\max(6,5)} = \frac{a_k}{\Delta l} \cdot \frac{H}{2} \cdot \left[\cosh\left(\frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot h\right) \right]^{-1} \quad (7.5)$$

Mit steigender Wellenhöhe H , zunehmender Wellenlänge L und abnehmender Wassertiefe h nimmt der maximale hydraulische Gradient an der Schichtgrenze $i_{\max(6,5)}$ zu. In Tabelle 7.3 sind die Parameter der Regressionsfunktion mit dem Koeffizienten a_k aus Gleichung 7.3 für drei Durchlässigkeitsbeiwerte des Filtermaterials $k_{f,F}$ dargestellt.

Tab. 7.3: Koeffizient a_k aus Gleichung 7.3 für verschiedene Durchlässigkeitsbeiwerte des Filters $k_{f,F}$ (Schichtdicke des Filters $SD_F = 0,40$ m; Durchlässigkeit des Basismaterials $k_{f,B} = 6,8 \cdot 10^{-4}$ m/s)

Koeffizienten a_k für verschiedene Durchlässigkeiten des Filters			
	Durchlässigkeitsbeiwert des Filtermaterials $k_{f,F}$		
	$k_{f,F(1)} = 2,00 \cdot 10^{-3}$ m/s	$k_{f,F(2)} = 1,25 \cdot 10^{-3}$ m/s	$k_{f,F(3)} = 5,00 \cdot 10^{-4}$ m/s
a_k	0,3045	0,2963	0,2677
R^2	0,9998	0,9997	0,9998

Mit steigender Durchlässigkeit des Filters nimmt der Koeffizient a_k sowie der hydraulische Gradient $i_{\max(6,5)}$ zu. Mit den Parametern aus Tabelle 7.3 wird die Ermittlung des maximalen hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ für die hydraulische Bemessung von Kornfiltern anhand der Wellenparameter Wellenhöhe H , Wellenperiode T , Wellenlänge L in der Wassertiefe h ermöglicht.

Der funktionale Zusammenhang in Gleichung 7.3 ergibt sich nach linearer Wellentheorie für den Übergangsbereich zwischen Tief- und Flachwasser ($0,05 \leq h/L \leq 0,5$) in Wassertiefen von $h = 15$ m bis 45 m, Wellenperioden von $T = 7,25$ s bis 14,00 s und Wellenhöhen von $H = 7,5$ m bis 35,1 m. Mit diesen Wellenparametern ergibt sich die Wellensteilheit zu $H/L = 0,004$ bis 0,142 und der Brecherindex zu $H/h = 0,34$ bis 0,78.

Mit zunehmender Durchlässigkeit des Filtermaterials nimmt der maximale hydraulische Gradient $i_{\max(6,5)}$ zu. Der Koeffizient a_k beschreibt den funktionalen Zusammenhang zwischen der Durchlässigkeit des Filtermaterials $k_{f,F}$ und dem hydraulischen Gradienten i_{\max} nach Gleichung 7.3 und beschreibt damit die Dämpfung des Porenwasserdrucks in der Filterschicht. Zu den untersuchten Durchlässigkeitsbeiwerten von $k_{f,F(1)} = 2,00 \cdot 10^{-3}$ m/s, $k_{f,F(2)} = 1,25 \cdot 10^{-3}$ m/s und $k_{f,F(3)} = 5,00 \cdot 10^{-4}$ m/s mit einer Schichtdicke des Filters $SD_F = 0,40$ m und einer Durchlässigkeit des Basismaterials $k_{f,B} = 6,8 \cdot 10^{-4}$ m/s kann der Koeffizient a_k aus Abbildung 7.6 entnommen werden.

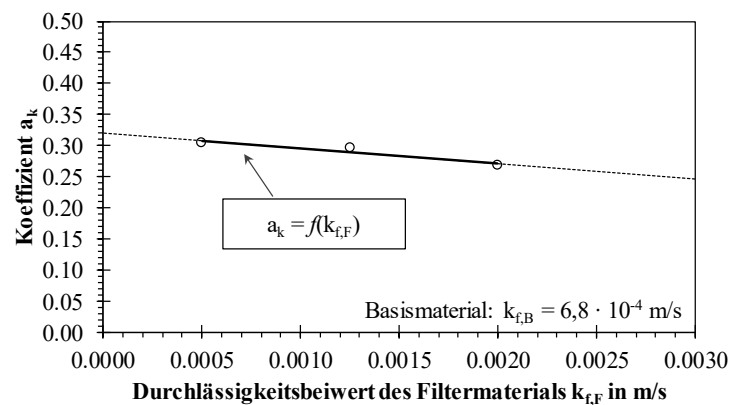


Abb. 7.6: Einfluss des Durchlässigkeitsbeiwertes des Filtermaterials (nach Darcy) auf den Koeffizienten a_k (aus Gleichung 7.2)

Der Einfluss der Wellenparameter (Wellenhöhe H und Wellenperiode T in Wassertiefe h) auf den maximalen hydraulischen Gradienten i_{\max} an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial bedarf weiterer Untersuchungen und Erweiterungen des numerischen Modells zu folgenden Punkten:

- Die Erweiterung der Druckrandbedingung an der Filteroberkante ist erforderlich, um den Einfluss der Druckverteilung unter fortschreitenden Wellen nach Wellentheorien höherer Ordnung auf die Porenwasserdruckverteilung im Filteraufbau zu untersuchen (Abschnitt 2.2.1).

- Der vereinfachte Ansatz aus Gleichung 7.3 ist anwendbar im Darcy-Strömungsregime und bedarf der Berücksichtigung der Turbulenz- und Trägheitseffekte bei größerer Durchlässigkeit und höherer kornbezogener Reynolds-Zahl ($Re^* > 1$). Zur Herleitung einer Funktion zur Ermittlung des Koeffizienten a_k (in Abbildung 7.6) für gröberes Filtermaterial bedarf es weiterer numerischer Untersuchungen unter Berücksichtigung des Fließwiderstands nach der erweiterten Darcy-Forchheimer-Gleichung (Gleichung 2.28).
- Die Kopplung des dynamischen Ansatzes nach Biot (1956b) mit der erweiterten Darcy-Forchheimer-Gleichung nach Polubarinova-Kochina (1962) wird zur Berücksichtigung der turbulenten Strömungskomponente und der Trägheitseffekte (Phasenverschiebung des Porenwasserdrucks) erforderlich.
- Der Einfluss der Wellenperiode T und der Wellenlänge L auf den hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze (Basis-/Filtermaterial) bedarf weiterer Untersuchungen mit einem verbesserten/erweiterten Labormodell (siehe Abschnitt 6.1.1) aufgrund der Änderungsgeschwindigkeit des Porenwasserdrucks und der Steigung der vertikalen Porenwasserdruckverteilung.
- Die durchgeführte Parameterstudie kann weiterhin zur Untersuchung der Einflüsse aus Filterauflast, Porosität und Sättigungsgrad auf den hydraulischen Gradienten mit einem erweiterten Modell ergänzt werden.
- Das linear elastische Bodenmodell kann durch elasto-plastische (Mohr-Coloumb) und Hypo-plastische Modelle erweitert werden (siehe Abschnitt 2.2.2), um Einflüsse der Verformung der Bodenmatrix auf den Fließwiderstand, Porenwasserdruckverteilung und damit auf den hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze zu untersuchen.

Zusammenfassend wurde in diesem Abschnitt die Herleitung der Berechnungsansätze zur Ermittlung des maßgebenden hydraulischen Gradienten i_{\max} beschrieben und deren Anwendungsgrenzen und Unsicherheiten diskutiert. Mit Gleichung 7.3 ist es möglich, unter Berücksichtigung der Wellenparameter (Wellenhöhe H , Wellenperiode T und Wellenlänge L in Wassertiefe h) sowie der Durchlässigkeit des Filtermaterials $k_{f,F}$, den maßgebenden hydraulischen Gradienten $i_{\max(6,5)}$ unterhalb der Schichtgrenze für die hydraulische Filterbemessung zu berechnen. Mit Hilfe dieser Berechnungsformeln kann die hydraulische Einwirkung i_{\max} dem kritischen hydraulischen Gradienten des Kornfilters zur Bewertung der hydraulischen Filterstabilität gegenübergestellt werden. Die hydraulische Filterstabilität ist gegeben, solange der maximale hydraulische Gradient nicht den kritischen hydraulischen Gradienten überschreitet ($i_{\max} \leq i_{\text{krit}}$):

$$\frac{i_{\max}}{i_{\text{krit}}} \leq 1 \quad (7.6)$$

Im nachfolgenden Abschnitt 7.1.2 wird dazu der kritische hydraulische Gradient i_{krit} in den Zusammenhang mit den geotechnischen Eigenschaften des Filtermaterials gebracht, sodass Berechnungsansätze hergeleitet werden können (Abschnitt 7.2).

7.1.2 Kritischer hydraulischer Gradient der Filterstabilität unter oszillierender Strömung

Mit dem Ziel hydraulische Filterkriterien unter welleninduzierter (oszillierender) Strömung herzuleiten, wird der Einfluss der geometrischen Eigenschaften des Basis- und Filtermaterials auf den kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} untersucht und der funktionale Zusammenhang $i_{krit} = f(d_{c,F}; d_{c,B}; n_F)$ zur Modellbildung hergestellt. Anschließend folgt die Einordnung der Ergebnisse mit vergleichbaren Ansätzen aus der Literatur. Zu diesem Zweck ist es notwendig, die kritischen hydraulischen Gradienten zu verschiedenen Stabilitätszuständen (unter Berücksichtigung von verwendeten Sicherheitsbeiwerten) sowie verschiedenen Abstandsverhältnissen in dieser Studie aufzubereiten, um (i) die Sensitivität der maßgebenden Parameter zu untersuchen, (ii) eine Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen herstellen zu können und (iii) um Empfehlungen für die hydraulische Bemessung von Kornfiltern aus Punkt (i) und (ii) ableiten zu können.

Stabilitätszustände: Die Stabilität des Filteraufbaus wird in drei Bereiche unterteilt und mit den zugehörigen Grenzen dieser Bereiche beschrieben (Abbildung 7.7), um die hydraulischen Gradienten i als Grenzbedingung zu folgenden Zuständen zu ermitteln:

- statisch stabil:* der Filter ist stabil und es tritt keine fortschreitende (vertikale) Verformung infolge der Kontakterosion auf (Bereich der hydraulischen Stabilität);
- semi-stabil (kritisch: Bewegungsbeginn):* Bewegungsbeginn im Übergangsbereich zwischen statisch stabil und dem instabilen Zustand; es treten anfängliche Materialumlagerungen ohne fortschreitende Verformung infolge der Kontakterosion auf (Bereich dynamischer Stabilität);
- instabil (Kontakterosion):* der überkritische Zustand beschreibt die Grenze zum instabilen Verhalten, ab dem die transiente Verformung infolge der Kontakterosion auftritt (Bereich des Filterversagens)

Der kritische hydraulische Gradient i_{krit} wird zum Bewegungsbeginn anhand des Setzungsverlaufs und der visuellen Beobachtungen ermittelt (siehe Abbildung 7.7 und Abschnitt 5.3).

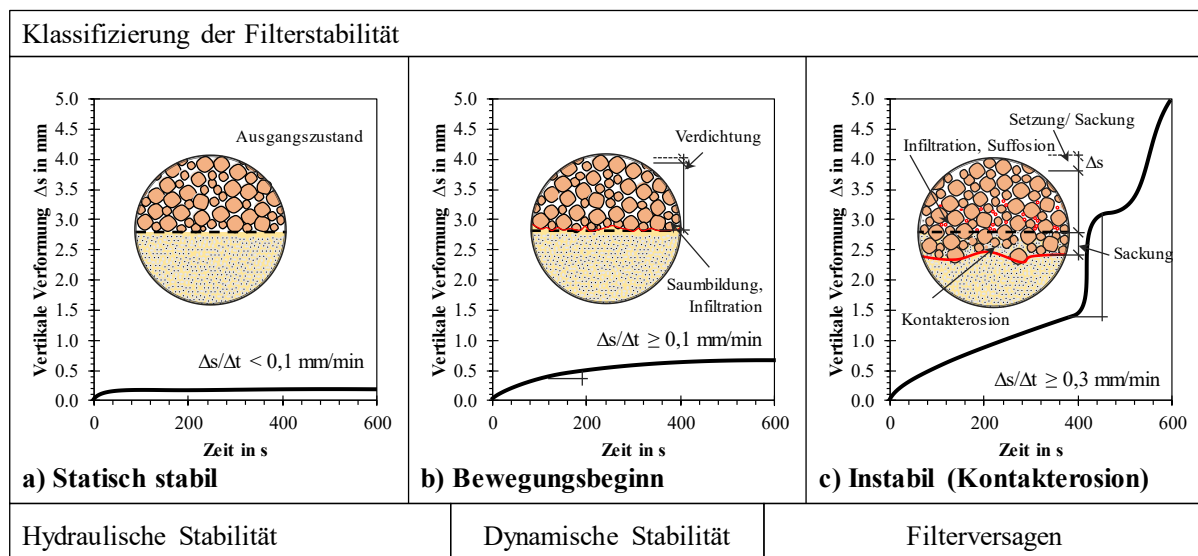


Abb. 7.7: Klassifizierung der Filterstabilität mit den drei Bereichen statisch stabil, Bewegungsbeginn und Kontakterosion (instabil)

Die hydraulische Stabilität des Kornfilters gegenüber Kontakterosion ist gegeben, bis der kritische hydraulische Gradient i_{krit} überschritten wird. Die kritischen hydraulischen Gradienten wurden anhand der

Grenzen der Filterstabilität aus Abbildung 7.7 ermittelt und mit dem Abstandsverhältnis $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$ in Abbildung 7.8 dargestellt.

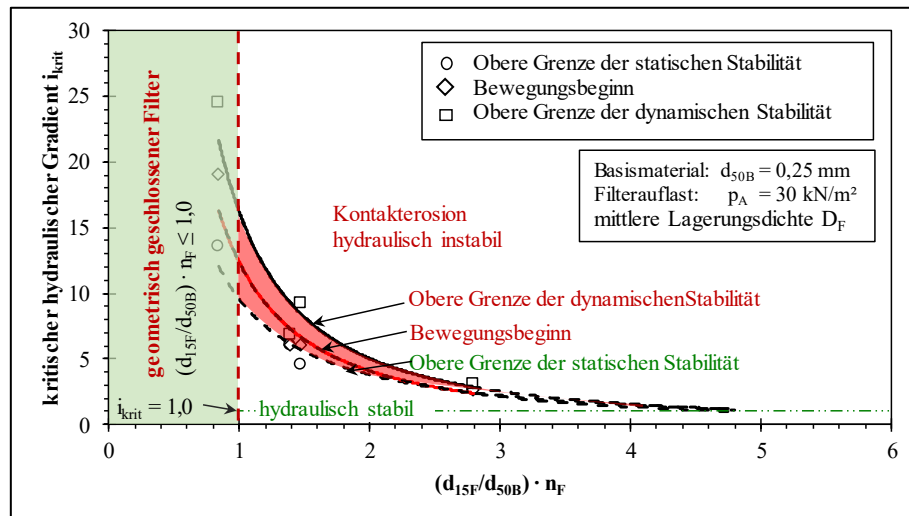


Abb. 7.8: Grenzen der Stabilitätszustände des Filters: obere Grenze der statischen Stabilität, Bewegungsbeginn und obere Grenze der dynamischen Stabilität

Die Einteilung der Grenzen in Abbildung 7.8 dient zur Einordnung der Ergebnisse mit Untersuchungen aus der Literatur und bietet die Möglichkeit in der Bemessung eine Sicherheit unterhalb des Bewegungsbeginns zur statischen Stabilität sowie eine (potentiell) wirtschaftlichere Bemessung oberhalb des Bewegungsbeginns mit der dynamischen Stabilität zu berücksichtigen. Zur Herleitung des funktionalen Zusammenhangs zwischen hydraulischen Gradienten der Grenzbedingungen bedarf es folgender Sensitivitätsanalysen:

- Ermittlung der charakteristischen Korngrößen und des charakteristischen Abstandsverhältnisses des untersuchten Basis- und Filtermaterials
- Einfluss der Porosität, Lagerungsdichte und Ungleichförmigkeit auf den kritischen hydraulischen Gradienten

Abstandsverhältnis und Porosität: Die Verwendung charakteristischer Korngrößen sowie daraus abgeleiteter Parameter, wie das Abstandsverhältnis und die Porosität n_F (als Funktion der Ungleichförmigkeit $U = d_{60}/d_{10}$ und der Lagerungsdichte D) sind einfach zu ermitteln und daher sehr praktikabel für die Anwendung der Bemessungskriterien. Die charakteristischen Korngrößen werden verwendet um das Verhältnis des Porendurchmessers im Filtermaterial zu dem Korndurchmesser der tragenden Bodenmatrix des Basismaterials abzubilden. Hierzu ist die Eignung der Abstandsverhältnisse für das untersuchte eng- bis weitgestufte Filtermaterial zu prüfen. Es wird dazu in diesem Abschnitt der Zusammenhang zwischen dem kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} und folgenden Eigenschaften des Basis- und Filtermaterials zur hydraulischen Filterbemessung hergestellt:

- Abstandsverhältnis zwischen den charakteristischen Korngrößen des Basis- und Filtermaterials
 - d_{15F}/d_{50B} (nach de Graauw et al. (1983))
 - d_{15F}/d_{85B} (nach Terzaghi (1943))
 - d_{50F}/d_{50B} (nach Prinz (1923), Davidenkoff (1967), Ziems (1968))
- Porosität des Filtermaterials n_F unter dem Einfluss der
 - Ungleichförmigkeit des Filtermaterials U_F und
 - Lagerungsdichte des Filtermaterials D_F

Die kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} ergeben sich durch die Porengeometrie des Filtermaterials und der Geometrie der Bodenmatrix des Basismaterials und werden basierend auf charakteristischen Korndurchmessern aus den Kornverteilungen des Basis- und Filtermaterials sowie der Porosität n (in Abhängigkeit der Lagerungsdichte D und Ungleichförmigkeit U) abgeleitet (siehe Abschnitt 2.1.5).

Sensitivitätsanalyse: Der kritische hydraulische Gradient i_{krit} wurde in Abschnitt 5.3 für die untersuchten Filterkonfigurationen analysiert und für die Stabilitätszustände (statisch stabil, Bewegungsbeginn und Kontakterosion) ermittelt (Abbildung 7.7). Die Unsicherheiten durch die Verwendung verschiedener Abstandsverhältnisse (d_{15F}/d_{50B} , d_{15F}/d_{85B} und d_{50F}/d_{50B}) sowie durch die Ermittlung der Porosität n_F unter dem Einfluss der Lagerungsdichte D_F und der Ungleichförmigkeit U_F des Filtermaterials mit dem Ansatz nach Beyer und Schweiger (1969) werden als Bandbreite des kritischen hydraulischen Gradienten ermittelt. Hierdurch wird eine bessere Einordnung der Ergebnisse dieser Studie im Vergleich zur Literatur und zur Erarbeitung von Empfehlungen zur Filterbemessung erreicht.

In Abbildung 7.10 a) sind die Ergebnisse dieser Studie zum Einfluss der Lagerungsdichte D_F auf den kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} mit folgenden Lagerungsdichten dargestellt:

- lockerste Lagerung D_{min} → hohe Porosität n_{max}
- mittlere (natürliche) Lagerung D_{mittel} → mittlere Porosität n_{mittel} und
- dichteste Lagerung D_{max} → geringe Porosität: n_{min}

Hierbei werden Lagerungsdichte D_F und Ungleichförmigkeit des Filtermaterials U_F , basierend auf dem Ansatz nach Beyer und Schweiger (1969), mit der Porosität n_F berücksichtigt (siehe Abschnitt 2.1.4). Der Einfluss der Lagerungsdichte D_F auf die Porosität n_F nimmt mit größerem Abstandsverhältnis d_{15F}/d_{50B} zu und erreicht bei dem untersuchten Filtermaterial eine Abweichung der Porosität n_F zwischen lockerster $D_{F,min}$ und dichtester Lagerung $D_{F,max}$ von bis zu 21 % (Abbildung 7.9).

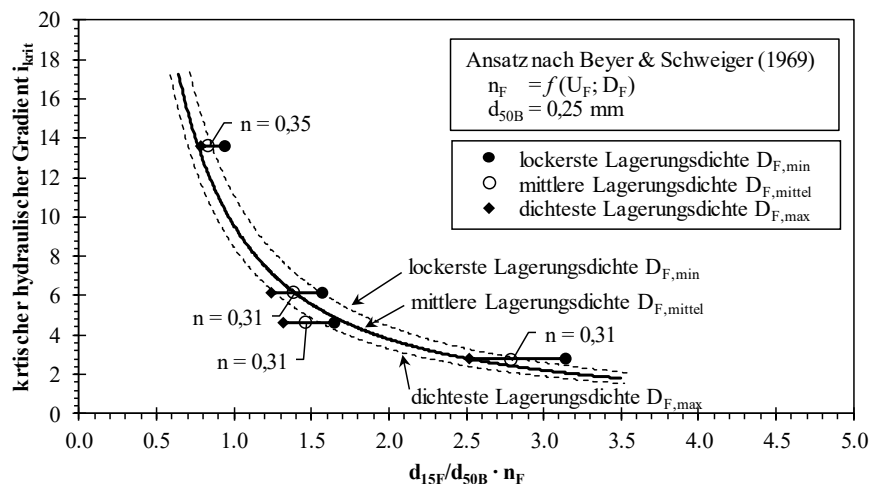


Abb. 7.9: Einfluss der Lagerungsdichte D_F und Porosität n_F auf den kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} zum Bewegungsbeginn für die untersuchten Filtermaterialien auf dem Basismaterial $d_{50B} = 0,25$ mm nach dem Ansatz von Beyer und Schweiger (1969)

Die Ermittlung des kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} in Abhängigkeit der Porosität n_F unterliegt damit Unsicherheiten in Bezug auf die Ungleichförmigkeit U_F und Lagerungsdichte D_F . Für die Herleitung hydraulischer Filterkriterien ist es sinnvoll, die Porosität n_F unter Berücksichtigung der Lagerungsdichte D_F und Ungleichförmigkeit U_F des Filtermaterials zu betrachten, um Vergleiche des zulässigen Abstandsverhältnisses $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$ mit Ansätzen der Literatur anstellen zu können.

Einordnung der Ergebnisse dieser Studie mit Ergebnissen aus der Literatur: Die Herleitung von zuverlässigen Kriterien für die hydraulische Bemessung benötigt eine Bestätigung und Erweiterung der erzielten Ergebnisse aus den Laborexperimenten. Durch die Gegenüberstellung der ermittelten Kurven des kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} als Funktion verschiedener Abstandsverhältnisse und der Porosität n_F , wie zum Beispiel $i_{krit} = f(d_{15F}; d_{50B}; n_F)$ können Übereinstimmungen und Unterschiede zu Untersuchungen aus der Literatur festgestellt und bewertet werden. Hierzu ist es erforderlich, möglichst gleiche Bedingungen der Laborexperimente für den Vergleich der kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} zu folgenden Punkten herzustellen:

- Strömungsbedingungen: vertikale schichtorthogonale Strömung durch den Filter auf einer Basisschicht (horizontale Schichtung)
- Materialeigenschaften: Kornverteilung der Sand- und Kies-Gemische
- Definition des Bewegungsbeginns: erste Bewegung infolge der Kontaktersion (ohne Berücksichtigung zusätzlicher Sicherheiten)

Untersuchungen zu schichtparalleler Strömung in horizontalen Filteraufbauten nach Bezuijen et al. (1987), Bakker et al. (1994) und Adel et al. (1994) sowie zu schichtparalleler Strömung in geneigten Deckwerken nach Klein Breteler et al. (1992), Wolters und van Gent (2012), van de Sande et al. (2015) und van Gent und Wolters (2015) eignen sich aufgrund der deutlich geringeren hydraulischen Gradienten (in der Größenordnung $i_{senkrecht} = O(10) \cdot i_{parallel}$) nicht zum Vergleich mit den Ergebnissen in dieser Studie (siehe auch Abschnitt 2.1.5). Die Eignung der Untersuchungen nach Davidenkoff (1967), Ziems (1968) und de Graauw et al. (1983) werden daher in Hinblick auf Strömungsbedingungen und Materialeigenschaften für den Vergleich mit dieser Studie bewertet (Tabelle 7.4).

Tab. 7.4: Auswahl geeigneter Untersuchungen zum Vergleich der kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} aus dieser Studie (siehe auch Abschnitt 2.1.5)

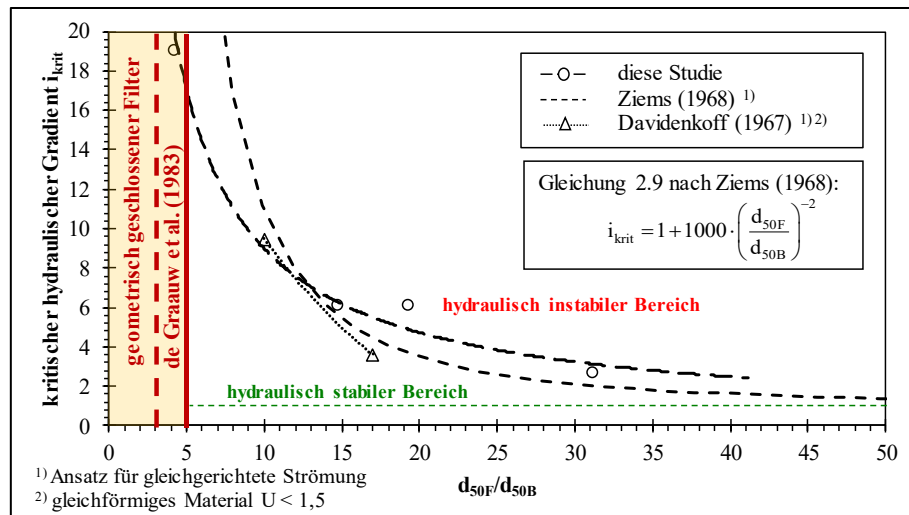
Autor	Strömungsbedingungen	Materialeigenschaften
Davidenkoff (1967) Abstandsverhältnis: d_{50F}/d_{50B} (aus Diagramm abgelesen)	vertikale schichtorthogonale gleichgerichtete Strömung	Basismaterial (sehr eng gestuft) $d_B = 0,1$ bis $0,2$ mm $d_{50B} \approx 0,15$ mm
Ziems (1968) Abstandsverhältnis: d_{50F}/d_{50B} (nach Gleichung 2.7)	vertikale schichtorthogonale gleichgerichtete Strömung	Basismaterial u.a. $d_{50B} = 0,20$ mm
de Graauw et al. (1983) Abstandsverhältnis: $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$ (aus Diagramm in Abbildung 2.9 abgelesen)	vertikale schichtorthogonale oszillierende Strömung und gleichgerichtete Strömung	Basismaterial $d_{50B} = 0,15$ mm und $0,55$ mm (oszillierende Strömung) Basismaterial $d_{50B} = 0,22$ mm (gleichgerichtete Strömung)
Diese Studie	vertikal schichtorthogonale oszillierende Strömung	Basismaterial $d_{50B} = 0,25$ mm

Die Untersuchungen nach Davidenkoff (1967), Ziems (1968) und de Graauw et al. (1983) lassen aufgrund der unterschiedlichen Strömungsbedingungen (gleichgerichtet und oszillierend) sowie unterschiedlicher Materialeigenschaften des Basis- und Filtermaterials keinen direkten Vergleich zu. Es ist jedoch möglich die Filterstabilität unter unidirektionaler und oszillierender Strömung relativ zu bewerten und auch das Stabilitätsverhalten unter gröberen und feineren Basismaterialien mit den Ergebnissen dieser Studie zu vergleichen (Tabelle 7.4). Weiterhin kann das unterschiedliche Verhalten zwischen

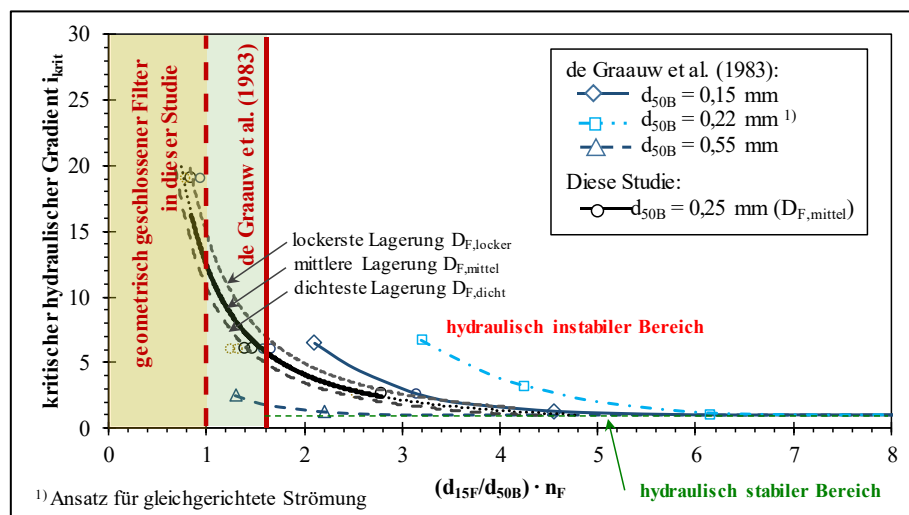
gleichgerichteter und oszillierender Strömung aus eigenen Untersuchungen (siehe Abschnitt 5.2.2) und aus den Untersuchungen nach de Graauw et al. (1983) zur Bewertung der Filterstabilität genutzt werden.

Die folgenden Vergleiche der kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} werden zum Bewegungsbeginn (ohne Sicherheitsbeiwerte) mit den jeweiligen Abstandsverhältnissen der Untersuchungen durchgeführt:

- d_{50F}/d_{50B} nach Ziems (1968) und Davidenkoff (1967) in Abbildung 7.10 a)
- d_{15F}/d_{50B} nach de Graauw et al. (1983) in Abbildung 7.10 b)



- Vergleich des kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} zum Bewegungsbeginn mit den Untersuchungen nach Ziems (1968) und Davidenkoff (1967) unter gleichgerichteter Strömung in Abhängigkeit des Abstandsverhältnisses d_{50F}/d_{50B} (Kurve nach Ziems (1968) mit Gleichung 2.7; Daten aus Diagramm nach Davidenkoff (1967) abgelesen)



- Vergleich des kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} unter oszillierender Strömung mit den Untersuchungen nach de Graauw et al. (1983) zu gleichgerichteter und oszillierender Strömung mit dem Abstandsverhältnis $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$ (Kurven aus Diagramm nach de Graauw et al. (1983) abgelesen, Abbildung 2.9)

Abb. 7.10: Kritischer hydraulischer Gradient i_{krit} im Einfluss verschiedener Abstandsverhältnisse und Basismaterialien im Vergleich mit den Ergebnissen a) nach Davidenkoff (1967), Ziems (1968) und b) nach de Graauw et al. (1983)

a) Vergleich oszillierender und gleichgerichteter Strömung: Die kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} unter oszillierender Strömung sind in Abbildung 7.10 a) den Ergebnissen unter gleichgerichteter Strömung nach Ziems (1968) und Davidenkoff (1967) gegenübergestellt. Es besteht in dem Bereich $d_{50F}/d_{50B} \approx 10$ bis 15 eine sehr gute Übereinstimmung der kritischen hydraulischen Gradienten mit den Ergebnissen nach Ziems und Davidenkoff, jedoch sind außerhalb dieses Bereichs abweichende Steigungen erkennbar. Im maßgebenden Bereich des welleninduzierten hydraulischen Gradienten $i_{max(6,5)} < 4$ (siehe Abschnitt 7.1.1) lassen sich die relativ großen Abweichungen der Abstandsverhältnisse auf die fehlende Berücksichtigung der Porengeometrie weitgestufter Materialien durch die Ungleichförmigkeit und Porosität zurückführen, sodass ein Kriterium auf der Basis der mittleren Korndurchmesser d_{50F}/d_{50B} für die untersuchten Filtermaterialien ($U_F = 2,3$ bis 6,6) ungeeignet ist.

Bei sehr ähnlichem Basismaterial $d_{50B} = 0,22$ mm (nach de Graauw) und $d_{50B} = 0,25$ mm (in dieser Studie) zeigt sich der Unterschied anhand des wesentlich geringeren hydraulischen Gradienten unter oszillierender gegenüber gleichgerichteter Strömung. Die geringere Stabilität unter oszillierender Strömung ergibt sich zum einen aus der fehlenden Brückenbildung des Basismaterials im Porenraum des Filters (de Graauw et al., 1983) festgestellt wurde und zum anderen durch die Lockerung des Filtermaterials und die dynamischen Änderungen der Porengeometrie (Porendurchmesser und Porosität) aufgrund der reduzierten effektiven Spannungen infolge des Porenwasserüberdrucks (Groot et al., 2006) beschrieben (siehe Abschnitt 2.1.5 und 5.2.2).

b) Vergleich untersuchter Materialeigenschaften: Da die untersuchten Filtermaterialien in dieser Studie einen relativ hohen Feinanteil aufweisen, wird dies im Vergleich zu sehr enggestuftem Material im Abstandsverhältnis d_{50F}/d_{50B} nicht ausreichend berücksichtigt, wodurch im Vergleich mit dem Ansatz nach Davidenkoff (1967) und Ziems (1968) höhere kritische hydraulische Gradienten i_{krit} im Bereich $d_{50F}/d_{50B} > 15$ erreicht werden. Während nach Davidenkoff der kritische hydraulische Gradient i_{krit} mit steigendem Abstandsverhältnis deutlich stärker abnimmt, zeigt der Ansatz nach Ziems und die Ergebnisse dieser Studie flachere Verläufe und nähern sich asymptotisch an $i_{krit} = 1$ an. Im Vergleich zum Ansatz nach Ziems unter gleichgerichteter Strömung wird unter oszillierender Strömung ein geringeres Abstandsverhältnis erforderlich. Dies wird durch das untersuchte Filtermaterial F1C1 ($d_{50F}/d_{50B} = 4,2$) im Bereich der geometrischen Stabilität und durch das geometrische Kriterium nach de Graauw mit $d_{50F}/d_{50B} = 3$ bis 5 bestätigt.

Aus dem Vergleich des kritischen hydraulischen Gradienten mit dem Abstandsverhältnis $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$ nach de Graauw et al. (1983) in Abbildung 7.10 b) geht hervor, dass gröberes Basismaterial $d_{50B} = 0,55$ mm zu geringeren und feineres Basismaterial $d_{50B} = 0,15$ mm zu höheren kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} im Vergleich zu dem untersuchten Basismaterial $d_{50B} = 0,25$ mm führt. Je feiner der Korndurchmesser d_{50B} des Basismaterials, desto steiler verlaufen die Kurven (in Abbildung 7.10 b)) und desto größer wird der kritische hydraulische Gradient i_{krit} bei gleichem Abstandsverhältnis $A = d_{15F}/d_{50B}$ und gleicher Porosität n_F . Dies ist auf die höhere Durchlässigkeit des gröbereren Basismaterials und der damit verbundenen höheren Filtergeschwindigkeit zurückzuführen. Das Basismaterial nach Davidenkoff ist mit $d_{50B} \approx 0,15$ mm feiner als das Material in dieser Studie mit $d_{50B} = 0,25$ mm wodurch höhere kritische hydraulische Gradienten bei gleichem Abstandsverhältnis zu erwarten wären (Abbildung 7.10 a). Ein Grund für die geringere Stabilität nach Davidenkoff (1967) kann in der Definition des Grenzzustands der „ersten Bewegung“ mit einem strengeren Kriterium liegen. Im Vergleich der untersuchten Kornfilter nimmt der kritische hydraulische Gradient i_{krit} mit zunehmendem Korndurchmesser d_{15F} des Filtermaterials (bei sonst gleichen Bedingungen d_{50B} , n_F) durch den größeren Porendurchmesser ab und nähert sich asymptotisch an $i_{krit} = 1$ an.

Die Untersuchungen nach de Graauw et al. (1983) beziehen sich auf sehr ähnliche (hydraulische) Randbedingungen im Laborexperiment mit vertikal oszillierender Strömung lotrecht zur Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial. Dabei wies das untersuchte Basismaterial einen mittleren Korndurchmesser von $d_{50B} = 0,15$ mm und $0,55$ mm auf, sodass die Kurve dieser Studie bezogen auf ein Basismaterial mit $d_{50B} = 0,25$ mm entsprechend zwischen den beiden Kurven nach de Graauw et al. (1983) verläuft. Durch die Interpolation der Kurven nach de Graauw zur Ermittlung des kritischen hydraulischen Gradienten zum Basismaterial $d_{50B} = 0,25$ mm besteht eine gute Übereinstimmung der Kurve zu lockerster Lagerung (siehe Abbildung 7.11).

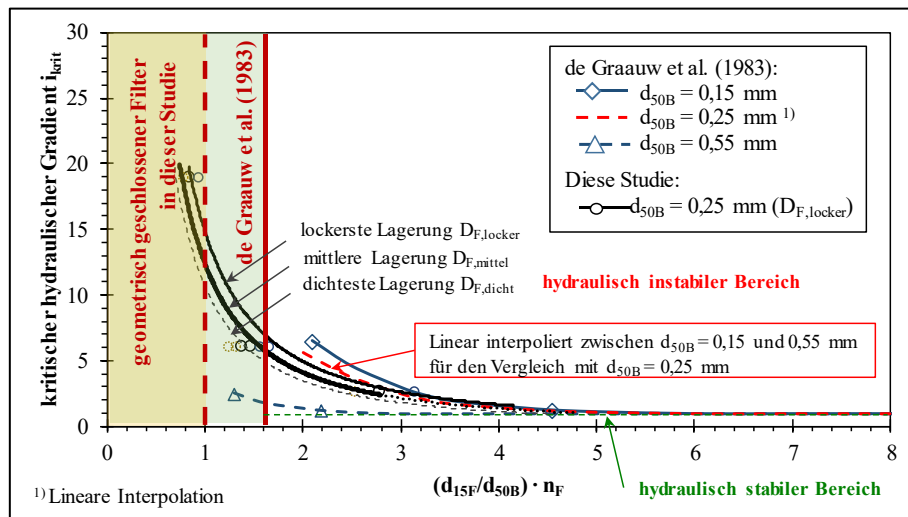


Abb. 7.11: Vergleich des kritischen hydraulischen Gradienten für das untersuchte Basismaterial ($d_{50B} = 0,25$ mm) durch lineare Interpolation¹⁾ der Ergebnisse nach de Graauw et al. (1983)

¹⁾ Die lineare Interpolation zwischen den beiden Materialien ($d_{50B} = 0,15$ mm und $0,55$ mm) wird ausschließlich für die Einordnung der Ergebnisse durchgeführt. Für die hydraulische Filterbemessung ist dieser Schritt nicht zulässig, da hierdurch nichtlineare Effekte (der Einwirkung und des Widerstands) unberücksichtigt bleiben.

Die Laborexperimente mit dem Basismaterial $d_{50B} = 0,25$ mm werden somit durch die Untersuchungen nach de Graauw et al. (1983) durch den parallelen Verlauf der Kurven unterstützt und mit einer guten Übereinstimmung der interpolierten Kurve bestätigt (siehe Abbildung 7.11). Im Vergleich der kritischen hydraulischen Gradienten als Funktion des Abstandsverhältnisses $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$ nach de Graauw et al. (1983) besteht ein relativ guter Zusammenhang zu Filtermaterialien mit lockerster Lagerung. Die relative Abweichung des kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} beträgt 4 % bis 14 % (für Abstandsverhältnisse im Bereich $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F = 2$ bis 5). Die Porosität n_F und die Lagerungsdichte D_F des Filtermaterials konnten in den Laborexperimenten nicht exakt ermittelt werden. Der lockere Einbau des Materials unter Wasser lässt jedoch eine Lagerungsdichte im Bereich lockerster bis mitteldichter Lagerung erwarten. Zur Herleitung der hydraulischen Filterkriterien führt daher die Annahme einer mittleren Lagerungsdichte im Laborexperiment zu geringeren kritischen hydraulischen Gradienten und liegt damit auf der sicheren Seite.

Die Ergebnisse dieser Studie erweitern damit die vorhandenen Ergebnisse nach de Graauw um das untersuchte Basismaterial ($d_{50B} = 0,25$ mm), weitere Materialkombinationen ($d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F = 0,8$ bis $2,8$) und um höhere welleninduzierte Gradienten ($i_{krit} = 2,7$ bis $19,0$).

Der Vergleich der Laborexperimente mit den Untersuchungen nach Davidenkoff (1967), Ziems (1968) und de Graauw et al. (1983) führt zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Der Einfluss der Lagerungsdichte D_F und der Ungleichförmigkeit U_F auf die Porosität n_F und damit auf die Porengeometrie des Filtermaterials erfordert die Berücksichtigung dieser Parameter für die Ermittlung des kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} und für das zulässige Abstandsverhältnis für die hydraulische Bemessung weitgestufter Filter.
- Die Anwendung des hydraulischen Kriteriums nach Ziems ergibt zu hohe Abstandsverhältnisse im Bereich hoher Gradienten und liegt damit auf der unsicheren Seite für oszillierende Strömung.
- Weiterhin berücksichtigt das hydraulische Kriterium nach Ziems mit einem Abstandsverhältnis von d_{50F}/d_{50B} nicht den Feinanteil und die Porosität, die den Porenraum von weitgestuften Filtermaterialien bestimmen.
- Es besteht eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse aus den Laborexperimenten (mit den Filterkonfigurationen F1A2, F1A3, F1C1 und F2A1) zum kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} als Funktion des Abstandsverhältnisses $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$ mit den Untersuchungen nach de Graauw et al. (1983).
- Im Vergleich der kritischen hydraulischen Gradienten nach de Graauw besteht ein guter Zusammenhang zu Filtermaterialien mit lockerster Lagerung (Abbildung 7.11), aufgrund der Unsicherheiten in der Ermittlung der Porosität n_F wird jedoch zur Herleitung der hydraulischen Filterkriterien die mittlere Lagerungsdichte D_F auf der sicheren Seite gewählt.
- Für die Anwendung der hydraulischen Filterkriterien ist es sinnvoll, die Funktion des zulässigen Abstandsverhältnisses A für das untersuchte Basismaterial ($d_{50B} = 0,25 \text{ mm}$) mit $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F = f(i_{max})$ herzuleiten.

c) Herleitung der hydraulischen Filterkriterien und Empfehlungen für die Filterbemessung: Es ist das Ziel, hydraulische Filterkriterien aus den Laborexperimenten und den vorhandenen Ansätzen der Literatur herzuleiten. Aus der vorangegangenen Sensitivitäts- und Vergleichsanalyse der maßgebenden bodenmechanischen Parameter ist der Zusammenhang zwischen dem kritischen hydraulischen Gradienten und dem Produkt aus dem Abstandsverhältnis d_{15F}/d_{50B} und der Porosität n_F unter Berücksichtigung der Lagerungsdichte D_F und der Ungleichförmigkeit U_F des Filtermaterials festgestellt worden. In diesem Abschnitt wird hierzu der funktionale Zusammenhang zur Herleitung von Bemessungsformeln der hydraulischen Filterstabilität im nachfolgenden Abschnitt 7.2 zu folgenden Punkten beschrieben und diskutiert:

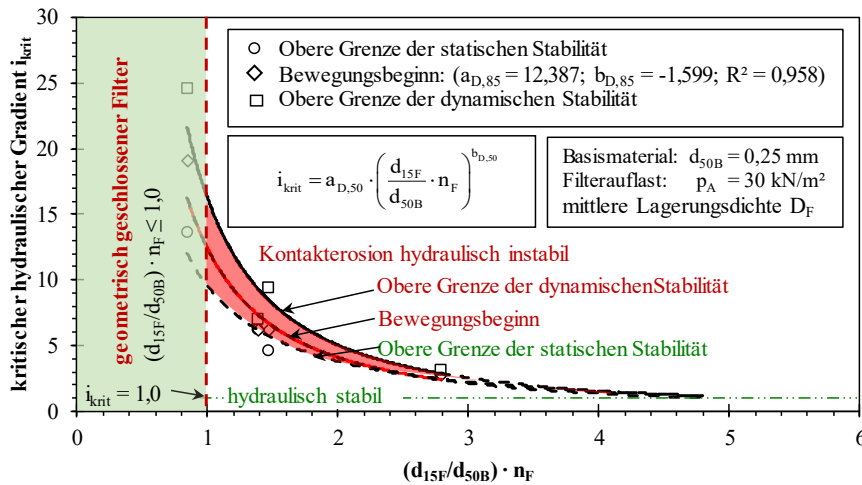
- Beschreibung des kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} als Funktion von:
 - $i_{krit} = f(d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F)$
 - $i_{krit} = f(d_{15F}/d_{85B} \cdot n_F)$
- Ermittlung der Grenze zum geometrisch geschlossenen Filter mit:
 - $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$
 - $d_{15F}/d_{85B} \cdot n_F$

Zur Herleitung von Bemessungsformeln zur hydraulischen Filterstabilität wird der hydraulische Gradient an den Grenzen folgender Stabilitätszustände ermittelt (siehe Abschnitt 5.3):

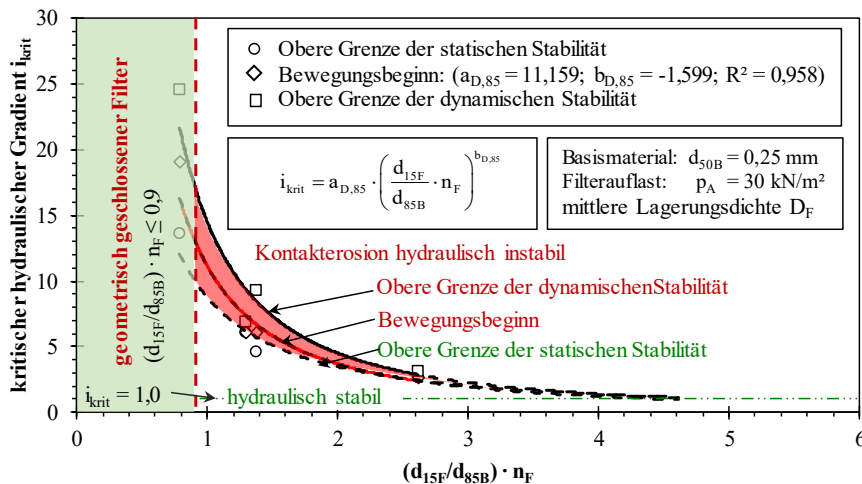
- geometrische Stabilität
- hydraulische Stabilität (statisch stabil)
- Bewegungsbeginn (kritischer Zustand)
- Kontakterosion (hydraulisch instabil, überkritischer Zustand)

Neben der Grenze des Bewegungsbeginns können somit in der Bemessung eine zusätzliche Sicherheit zur statischen Stabilität oder eine anfängliche Verformung des Filters zur dynamischen Stabilität zugelassen werden. Hierzu ist der Einfluss des Abstandsverhältnisses und der Porosität des Filtermaterials n_F

auf den kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} mit a) d_{15F}/d_{50B} (nach de Graauw) in Abbildung 7.12 a) und b) d_{15F}/d_{85B} (nach Terzaghi) in Abbildung 7.12 b) dargestellt.



a) Kritischer hydraulischer Gradient i_{krit} als Funktion des Abstandsverhältnisses $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$



b) Kritischer hydraulischer Gradient i_{krit} als Funktion des Abstandsverhältnisses $d_{15F}/d_{85B} \cdot n_F$

Abb. 7.12: Einfluss der Abstandsverhältnisse $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$ und $d_{15F}/d_{85B} \cdot n_F$ auf den kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} zu den Grenzen der statischen Stabilität, des Bewegungsbeginns und der dynamischen Stabilität (für mittlere Lagerungsdichte des Filtermaterials D_F)

Die untere Kurve (gestrichelt) in Abbildung 7.12 beschreibt die Grenze des statisch stabilen Bereiches ohne vertikale Verformung des Filters eignet sich daher zur hydraulischen Filterbemessung auf der sicheren Seite. Die obere Kurve (rot) beschreibt die kritische Grenze zwischen dem semi-stabilen Verhalten zum instabilen Verhalten des Filters und zeigt damit den relativ großen Übergangsbereich zwischen statischer Stabilität und dem Filterversagen auf. Zwischen beiden Kurven liegt die für die Bemessung maßgebende Kurve des Bewegungsbeginns (rote Fläche) als Mittelwert der statisch stabilen und der instabilen Grenzkurve. Aufgrund der relativ großen Unsicherheit im dynamischen semi-stabilen Bereich des Filterzustands eignet sich die Kurve des Bewegungsbeginns für die hydraulische Filterbemessung und die Grenzkurve der statischen Stabilität unter Berücksichtigung einer höheren Sicherheit.

Der kritische hydraulische Gradient i_{krit} an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial ($\Delta l = 0,10 \text{ m}$) ergibt sich für das untersuchte Basismaterial ($d_{50B} = 0,25 \text{ mm}$, $U_B = 1,29$) und mittlerer Lagerungsdichte D_F des Filtermaterials zu:

$$i_{\text{krit}} = a_{D,50} \cdot \left(\frac{d_{15F}}{d_{50B}} \cdot n_F \right)^{b_{D,50}} \quad (7.7)$$

$$i_{\text{krit}} = a_{D,85} \cdot \left(\frac{d_{15F}}{d_{85B}} \cdot n_F \right)^{b_{D,85}} \quad (7.8)$$

mit:

i_{krit} : kritischer hydraulischer Gradient an der Schichtgrenze

d_{15F}/d_{50B} : Abstandsverhältnis der Korndurchmesser des Filtermaterials bei 15 % Massendurchgang und des Basismaterials bei 50 % Massendurchgang

d_{15F}/d_{85B} : Abstandsverhältnis der Korndurchmesser des Filtermaterials bei 15 % Massendurchgang und des Basismaterials bei 85 % Massendurchgang

n_F : Porosität des Filtermaterials

$a_{D,i}$: Koeffizient unter dem Einfluss des Abstandsverhältnisses und der Stabilitätsgrenzen nach Tabelle 7.5

$b_{D,i}$: Exponent unter dem Einfluss des Abstandsverhältnisses und der Stabilitätsgrenzen nach Tabelle 7.5

Der Einfluss der Lagerungsdichte D_F des Filtermaterials auf den kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} kann unter Anwendung des Ansatzes nach Beyer und Schweiger (1969) zur Ermittlung der Porosität n_F (siehe Abschnitt 2.1.4) in nach Gleichung 7.7 und 7.8 mit dem Koeffizienten $a_{D,i}$ und dem Exponenten $b_{D,i}$ nach Tabelle 7.5 berücksichtigt werden.

Tab. 7.5: Koeffizient $a_{D,i}$ und Exponent $b_{D,i}$ der Gleichungen 7.7 und 7.8 für drei Stabilitätsgrenzen für mittlere Lagerungsdichte $D_{F,\text{mittel}}$

Abstandsverhältnis	d_{15F}/d_{50B}			d_{15F}/d_{85B}		
Stabilitätsgrenze	$a_{D,50}$	$b_{D,50}$	R^2	$a_{D,85}$	$b_{D,85}$	R^2
Obere Grenze der statischen Stabilität	9,562	-1,334	0,945	8,765	-1,334	0,945
Bewegungsbeginn	12,387	-1,599	0,958	11,159	-1,599	0,958
Obere Grenze der dynamischen Stabilität	16,212	-1,689	0,945	14,519	-1,689	0,945

Gleichung 7.7 kann im Bereich zwischen $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F = 1$ bis 5 zur Ermittlung des kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} angewendet werden. Im Bereich größerer Abstandsverhältnisse mit $(d_{15F}/d_{50B}) \cdot n_F > 5$ verläuft der kritische hydraulische Gradient nach Ziems (1968) und de Graauw et al. (1983) ohne Berücksichtigung einer zusätzlichen Sicherheit parallel zu $i_{\text{krit}} = 1,0$. Die untere Grenze ist aus dem Kriterium des hydraulischen Grundbruchs hergeleitet. Im Bereich $(d_{15F}/d_{50B}) \cdot n_F \leq 1$ wird ein geometrisch geschlossener Filter erreicht.

Das Kriterium zur geometrischen Filterstabilität in Gleichung 7.9 beschreibt die Stabilität des Filters unabhängig von der hydraulischen Einwirkung (bei ausreichend hoher Filterauflast). Der Bereich des geometrisch geschlossenen Filters ergibt sich aus der Porengeometrie des Filters, wodurch das Material der tragenden Bodenmatrix des Basismaterials nicht den (geometrisch geschlossenen) Porenraum des Filters passieren kann. Ein geometrisch geschlossener Filter wird nach de Graauw et al. (1983) unter oszillierender Strömung unter der Bedingung $(d_{15F}/d_{50B}) \cdot n_F \leq 1,0$ bis 1,6 erreicht. Der geometrisch stabile Filterzustand konnte für die Filterkonfiguration F1C1 mit $(d_{15F}/d_{50B}) \cdot n_F = 0,84$ (bei mittlerer

Lagerungsdichte) erreicht werden (siehe Abbildung 7.10). Die Filtermaterialien F1A2 mit $(d_{15F}/d_{50B}) \cdot n_F = 1,49$ und F1A3 mit $(d_{15F}/d_{50B}) \cdot n_F = 1,43$ liegen in diesem Bereich, weisen aber kein geometrisch stabiles Verhalten auf, sodass ein strengeres Kriterium (an der unteren Grenze) erforderlich wird:

$$\frac{d_{15F}}{d_{50B}} \cdot n_F \leq 1,0 \quad (\text{geometrisch geschlossen}) \quad (7.9)$$

Neben dem hydraulischen Kriterium aus Gleichung 7.10 ergibt sich (unter Berücksichtigung des Abstandsverhältnisses d_{15F}/d_{85B} und der Porosität des Filtermaterials n_F) das Kriterium des geometrisch geschlossenen Filters aus Gleichung 7.9 wie folgt (siehe auch Abbildung 7.12):

$$\frac{d_{15F}}{d_{85B}} \cdot n_F \leq 0,9 \quad (\text{geometrisch geschlossen}) \quad (7.10)$$

Das konservative Kriterium ergibt sich aus dem Ansatz nach de Graauw et al. (1983) in Gleichung 7.9 bezogen auf das untersuchte Basismaterial ($d_{50B} = 0,252$ mm, $d_{85B} = 0,269$ mm) im geometrisch stabilen Zustand.

Vergleich der Ergebnisse mit Ansätzen aus der Literatur: Es besteht eine relativ gute Übereinstimmung mit einer relativen Abweichung von $\Delta x \leq 14$ % in Bezug auf den kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} zum Bewegungsbeginn unter oszillierender Strömung nach de Graauw et al. (1983) (durch Interpolation für das Basismaterial $d_{50B} = 0,25$ mm ermittelt) und den Ergebnissen dieser Studie (Abbildung 7.11). Durch die Bestätigung und Erweiterung der Ansätze nach Davidenkoff (1967), Ziems (1968) und de Graauw et al. (1983) wird die Ermittlung des erforderlichen Abstandsverhältnisses bei vorgegebenem maximalen hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze $i_{max(6,5)}$ für die hydraulische Filterbemessung mit Gleichung 7.7 und 7.8 ermöglicht.

Hydraulische Filterstabilität: Die kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} können zu den Grenzen der statischen Stabilität, Bewegungsbeginn und dynamische Stabilität mit den Koeffizienten a_D und Exponenten b_D nach Tabelle 7.5 ermittelt werden. Die Berechnungsformeln zur Ermittlung des kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} berücksichtigen die Porosität des Filtermaterials n_F basierend auf einer mittleren Lagerungsdichte des Filtermaterials D_F und der jeweiligen Ungleichförmigkeit U_F . Für die hydraulische Filterbemessung sollte die Porosität n_F des Filtermaterials mit einer gewählten Ungleichförmigkeit für mitteldichte bis lockere Lagerungsdichte ermittelt werden. Hierdurch liegt der kritische hydraulische Gradient i_{krit} nach Gleichung 7.7 und 7.8 für das gewählte Abstandsverhältnis $(d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$ bzw. $d_{15F}/d_{85B} \cdot n_F)$ und auf der sicheren Seite. Für weitgestuftes Filtermaterial eignet sich das Abstandsverhältnis $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$ und $d_{15F}/d_{85B} \cdot n_F$ deutlich besser als d_{50F}/d_{50B} , da die Porengeometrie des Filters durch den Feinanteil und die Porosität berücksichtigt wird.

Geometrische Filterstabilität: Neben der hydraulischen Filterstabilität aus Gleichung 7.8 können mit Gleichung 7.9 das erforderliche Abstandsverhältnis d_{15F}/d_{50B} und die Porosität n_F zur geometrischen Stabilität ermittelt werden. Es ist somit möglich, zunächst die hydraulische Stabilität zu überprüfen. Bei hohen hydraulischen Gradienten und Unterschreiten des erforderlichen Abstandsverhältnisses $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F < 1$ ist das geometrische Kriterium aus Gleichung 7.9 anzuwenden. Das Abstandsverhältnis $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$ dient zum Vergleich der Untersuchungen mit dem Ansatz nach de Graauw et al. (1983) und das Abstandsverhältnis $d_{15F}/d_{85B} \cdot n_F$ dient zum Vergleich mit Ansätzen basierend auf dem Kriterium nach Terzaghi, wie zum Beispiel nach SPM (1984) und CEM (2008).

Hydraulischen Filterkriterien: Der Ansatz der hydraulischen Filterstabilität ist für den Bereich der untersuchten Abstandsverhältnisse $d_{15F}/d_{85B} = 2,3$ bis $8,3$, der Ungleichförmigkeiten $U_F = 2,3$ bis $6,6$ und Porositäten (nach Beyer und Schweiger (1969)) $n_F = 0,31$ bis $0,35$ (bei mittlerer Lagerungsdichte) bei einer ausreichend hohen Auflast von $p_{\text{Auflast}} = 30 \text{ kN/m}^2$ hergeleitet. Lagerungsdichte und Porosität stehen in einem engen Zusammenhang und haben einen Einfluss auf das zulässige Abstandsverhältnis beziehungsweise auf den kritischen hydraulischen Gradienten. Da sich beide Parameter in hydraulischen Laborversuchen nur annähernd erfassen lassen, unterliegt die Ermittlung der Porosität n_F zwischen mittlerer und lockerster Lagerung (unter Anwendung des Ansatzes nach Beyer und Schweiger (1969)) einer Unsicherheit von bis zu 11 % (bei der höchsten untersuchten Ungleichförmigkeit von $U_F = 6,6$ der Filterkonfiguration F1A3; siehe Abbildung 7.9).

Bei weiteren Versuchen mit hohem Abstandsverhältnis $d_{15F}/d_{85B} = 19,9$ mit $U_F = 5,5$ und $n_F = 0,31$ (bei mittlerer Lagerungsdichte) konnte ein sehr dynamisches Verhalten schon bei geringeren Gradienten, aber dennoch eine vergleichbar hohe (dynamische) Stabilität gegenüber einem Filtermaterial mit geringerem Abstandsverhältnis $d_{15F}/d_{85B} = 4,5$ mit $U_F = 5,9$ und $n_F = 0,31$ (bei mittlerer Lagerungsdichte) festgestellt werden. Zur Herleitung dynamischer Stabilitätskriterien bedarf es weiterer Laborexperimente mit einer hohen Anzahl der Wellenzyklen ($n > 1000$ Wellen) zur Untersuchung der Dynamik der bodenmechanischen und geohydraulischen Prozesse.

Die Analyse der Filterstabilität unter oszillierender Strömung führt zu Kriterien für die geometrische und hydraulische Filterstabilität. Die Filterstabilität kann neben geometrischen Kriterien durch hydraulische Filterkriterien mit folgenden Grenzzuständen beschrieben werden (siehe auch Abschnitt 5.3):

Statische Stabilität: der Filter ist stabil und es tritt keine vertikale Verformung infolge der Kontakterosion auf;

Bewegungsbeginn: Bewegungsbeginn im Übergangsbereich zwischen dem statisch stabilen und dem instabilen Zustand; es treten anfängliche Materialumlagerungen ohne fortschreitende Verformung infolge Kontakterosion auf (dynamischer semi-stabiler Zustand);

Die hergeleiteten hydraulischen Filterkriterien werden für die Anwendung in der Baupraxis in Abschnitt 7.2 zusammengefasst und mit einem Bemessungsbeispiel anschaulich dargestellt.

7.2 Hydraulische und geometrische Filterbemessung

Das Ziel der hydraulischen Filterbemessung ist es, die erforderlichen geotechnischen und geometrischen Eigenschaften des Filteraufbaus auf den gegebenen Untergrund (Basismaterial) und die (welleninduzierte) hydraulische Einwirkung abzustimmen. Die Einwirkung der welleninduzierten Strömungen auf einen Filteraufbau in Sohlsicherungen im Offshore- und Küstenbereich und der Widerstand des Filters gegenüber der Kontakterosion werden für die geometrische und hydraulische Filterbemessung bewertet.

Die Herleitung der Bemessungsformeln erfolgt hierzu in zwei Schritten: (i) Ermittlung des maßgebenden hydraulischen Gradienten in Abhängigkeit der Wellenparameter (siehe Abschnitt 7.1.1) sowie (ii) Ermittlung der erforderlichen Eigenschaften des Filtermaterials in Abhängigkeit des kritischen hydraulischen Gradienten (siehe Abschnitt 7.1.2). Diese beiden Schritte werden in den folgenden Abschnitten in Bemessungsformeln und ein Bemessungsdiagramm zur Ermittlung des zulässigen Abstandsverhältnisses für die Anwendung in der Baupraxis zusammengeführt und diskutiert (siehe Abbildung 7.13).

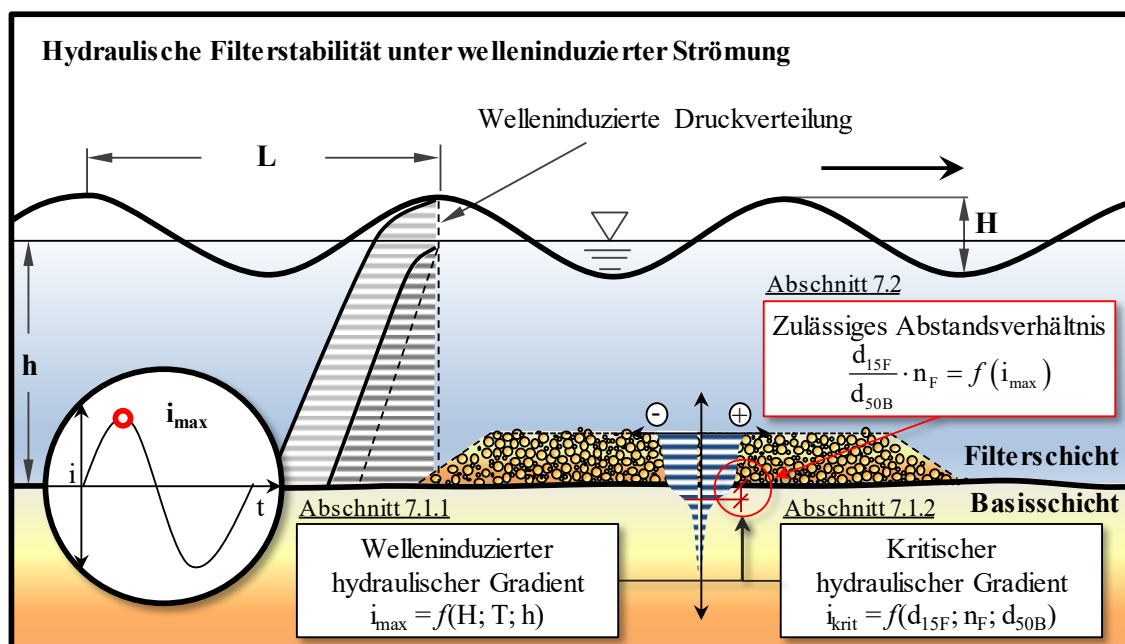


Abb. 7.13: Definitionsskizze zur hydraulischen Bemessung eines Kornfilters unter welleninduzierter schichtorthogonaler Strömung in einer horizontalen Filterschicht auf dem Meeresgrund

Aus den hydraulischen Laborexperimenten und den numerischen Untersuchungen ergeben sich für die hydraulische Filterbemessung folgende Ergebnisse:

- Funktionaler Zusammenhang zwischen dem einwirkenden Gradienten I' (an der Filteroberkante) und dem maximalen hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze $i_{\max(6,5)}$ nach Gleichung 7.2 unter Berücksichtigung der Wellenhöhe H , der Wellenperiode T und der Wassertiefe h nach linearer Wellentheorie (Abschnitt 7.1.1)
- Funktionaler Zusammenhang zwischen dem kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} zum Bewegungsbeginn infolge der Kontakterosion und den geotechnischen Eigenschaften des Basis- und Filtermaterials mit den charakteristischen Korngrößen d_{15F} , d_{50B} bzw. d_{85B} und der Porosität des Filtermaterials n_F mit geometrischen und hydraulischen Grenzbedingungen der Filterstabilität (Abschnitt 7.1.2)

Aus diesen Ergebnissen werden folgende Filterkriterien zur Ermittlung des zulässigen Abstandsverhältnisses zwischen den charakteristischen Korngrößen des Basis- und Filtermaterials abgeleitet:

- *Hydraulisches Filterkriterium:* Zulässiges Abstandsverhältnis unter dem Einfluss der Porosität des Filtermaterials n_F und des maximalen hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze i_{\max} (Abschnitt 7.2.1)
- *Geometrisches Filterkriterium:* Zulässiges Abstandsverhältnis zum Erreichen eines geometrisch geschlossenen Filters, der unabhängig von der hydraulischen Einwirkung statisch stabil ist (Abschnitt 7.2.2)

7.2.1 Hydraulisches Filterkriterium

Das hydraulische Filterkriterium wird mit folgenden Zielen hergeleitet und diskutiert: (i) Verbesserung des Verständnisses vorhandener Kriterien durch Einordnung der Ergebnisse dieser Arbeit, (ii) Aufbereitung der ermittelten Grundlagen für die Anwendung in der Baupraxis und (iii) Zusammenfassung und Gewichtung des weiteren Forschungsbedarfs zur hydraulischen Filterbemessung. Zu diesem Zweck werden die erforderlichen Schritte zur Herleitung der Bemessungsformeln und Bemessungsdiagramme beschrieben und mit Bemessungsbeispielen verdeutlicht.

Durch die Begrenzung der Schichtdicke des Basismaterials auf $SD_B = 0,40$ m und des relativ großen Einflusses der unteren Randbedingung auf den hydraulischen Gradienten im Laborexperiment wurden die Ergebnisse zum maximalen (welleninduzierten) hydraulischen Gradienten durch das numerische Modell erweitert. Der Zusammenhang zwischen Wellenparametern und hydraulischem Gradienten wurde hierzu mit einer ausreichend großen Basisschicht $SD_B = 3,0$ m untersucht. Das zulässige Abstandsverhältnis zwischen Basis- und Filtermaterial $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$ kann für das untersuchte Basismaterial ($d_{50B} = 0,25$ mm) nach Abbildung 7.14 grafisch ermittelt werden.

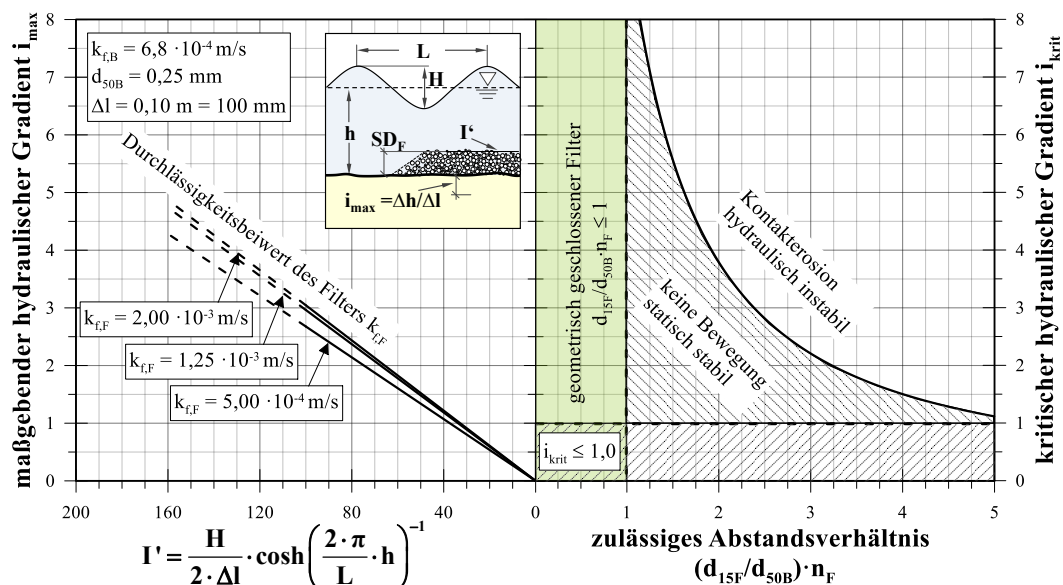


Abb. 7.14: Grafische Ermittlung des zulässigen Abstandsverhältnisses $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$ (für das Basismaterial $d_{50B} = 0,25$ mm)

Im Vergleich vorhandener Ansätze zu dem kritischen hydraulischen Gradienten unter oszillierender schichtorthogonaler Strömung mit den Ergebnissen dieser Studie hat sich die beste Übereinstimmung mit dem Ansatz nach de Graauw et al. (1983) zu dem Abstandsverhältnis $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$ gezeigt. Das

zulässige Abstandsverhältnis d_{15F}/d_{50B} unter Berücksichtigung der Porosität n_F wird durch das Gleichsetzen ($i_{\max} = i_{\text{krit}}$) des maximalen hydraulischen Gradienten i_{\max} aus Gleichung 7.11 (Abschnitt 7.1.1, Gleichung 7.3) mit dem kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} aus Gleichung 7.12 (Abschnitt 7.1.2, Gleichung 7.7) ermittelt. Der zulässige Korndurchmesser des Filtermaterials d_{15F} kann somit unter Berücksichtigung der Porosität des Filtermaterials n_F für das untersuchte Basismaterial ($d_{50B} = 0,25 \text{ mm}$) nach Gleichung 7.13 ermittelt werden:

$$i_{\max} = \frac{a_k}{\Delta l} \cdot \frac{H}{2} \cdot \left[\cosh \left(\frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot h \right) \right]^{-1} \quad (7.11)$$

$$i_{\text{krit}} = a_D \cdot \left(\frac{d_{15F}}{d_{50B}} \cdot n_F \right)^{b_D} \quad (7.12)$$

$$\text{mit: } i_{\max} \leq i_{\text{krit}} \Rightarrow \frac{d_{15F}}{d_{50B}} \cdot n_F \leq \left[\frac{a_k \cdot H}{a_D \cdot \Delta l \cdot 2 \cdot \cosh \left(\frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot h \right)} \right]^{\frac{1}{b_D}} \quad (7.13)$$

mit:

- i_{krit} : kritischer hydraulischer Gradient zum Bewegungsbeginn an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial (mit $\Delta l = 0,10 \text{ m}$)
- i_{\max} : maximaler welleninduzierter hydraulischer Gradient an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterials (mit $\Delta l = 0,10 \text{ m}$)
- d_{15F} : Korndurchmesser des Filtermaterials bei 15 % Massendurchgang in m
- d_{50B} : Korndurchmesser des Basismaterials bei 50 % Massendurchgang in m
- n_F : Porosität des Filtermaterials
- H : Wellenhöhe in m
- Δl : Sickerweg (hier: $\Delta l = 0,10 \text{ m}$)
- h : Wassertiefe in m
- L : Wellenlänge in m
- a_k : Koeffizient unter dem Einfluss der Filterdurchlässigkeit nach Tabelle 7.3
Bei einer Durchlässigkeit des Filters $k_{f,F} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ beträgt $a_k = 0,305$
- a_D : Koeffizient unter dem Einfluss der Lagerungsdichte D nach Tabelle 7.5
Bei mittlerer Lagerungsdichte beträgt $a_D = 12,387$
- b_D : Exponent unter dem Einfluss der Lagerungsdichte D nach Tabelle 7.5
Bei mittlerer Lagerungsdichte beträgt $b_D = -1,599$

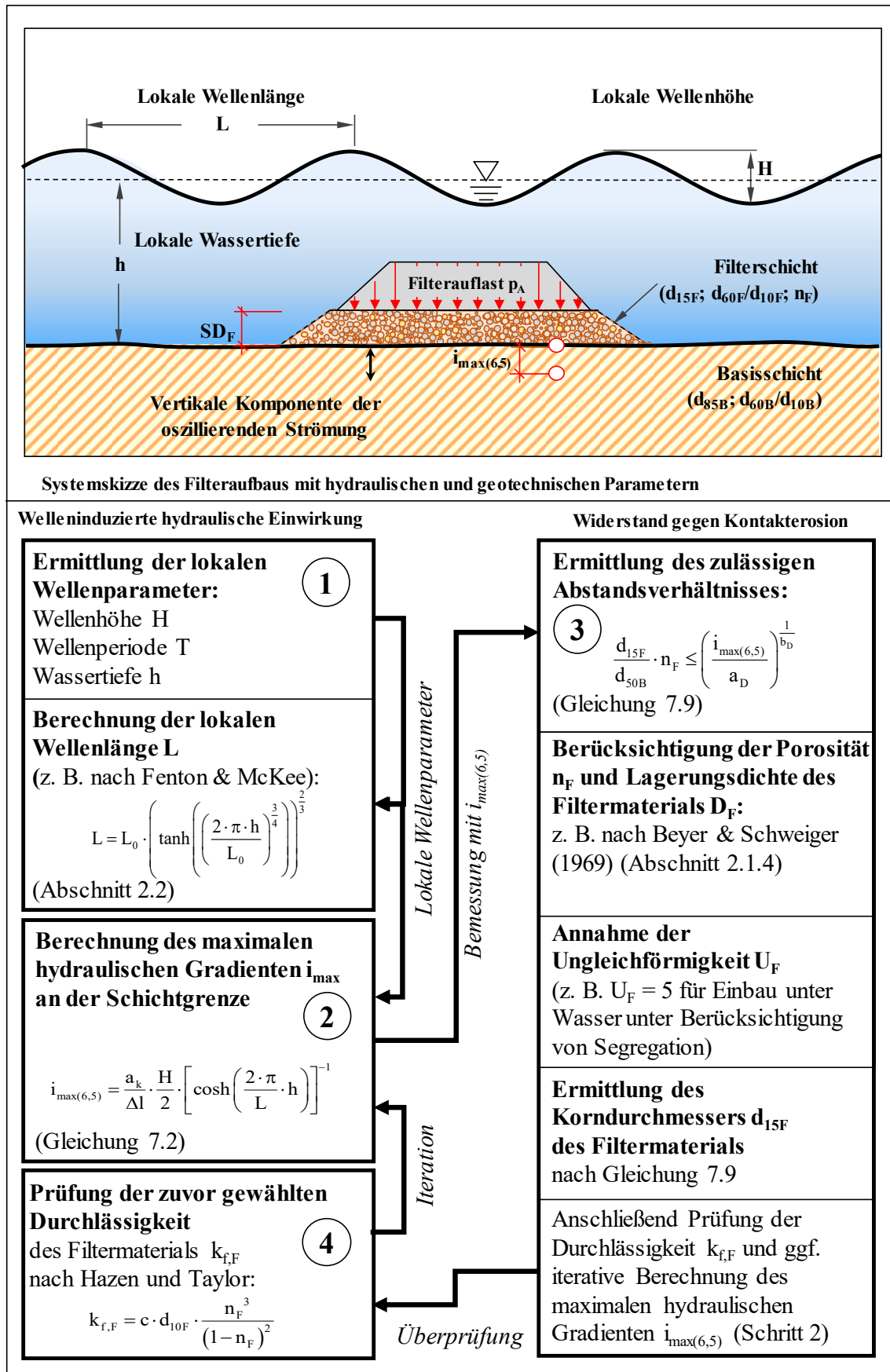
Die Berechnungsformeln zur Ermittlung des zulässigen Abstandsverhältnisses d_{15F}/d_{50B} werden in Abbildung 7.15 mit den Empfehlungen zur Ermittlung der hydraulischen und geotechnischen Randbedingungen zusammengefasst. Zur grafischen Ermittlung des zulässigen Abstandsverhältnisses d_{15F}/d_{50B} ist in Anhang E.1 ein Bemessungsbeispiel für einen Filteraufbau einer Sohlsicherung in einer Wassertiefe von $h = 25,0 \text{ m}$ dargestellt. Zur hydraulischen Filterbemessung unter welleninduzierter Strömung ergeben sich folgende Empfehlungen:

- Die Ermittlung der lokalen Wellenlänge L am Bauwerk kann vereinfacht mit dem Ansatz nach Fenton und McKee (1990) erfolgen.
- Der maximale (welleninduzierte) hydraulische Gradient i_{\max} und der kritische hydraulische Gradient i_{krit} können zum Vergleich mit anderen Studien durch den betrachteten Sickerweg in dieser Studie mit $\Delta l = 0,1 \text{ m}$ unterhalb der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filterschicht für die jeweils vorliegende Geometrie berechnet werden.

- Das zulässige Abstandsverhältnis d_{15F}/d_{50B} kann als Erweiterung des Ansatzes nach de Graauw et al. (1983) zu dem untersuchten Basismaterial ($d_{50B} = 0,25 \text{ mm}$) unter Berücksichtigung der Porosität des Filtermaterials n_F nach Abbildung 7.15 und Anhang E.1 angewendet werden.
- Die Porosität n_F steht unter dem Einfluss der Ungleichförmigkeit U_F und der Lagerungsdichte D_F des Filtermaterials und kann mit dem Ansatz nach Beyer und Schweiger (1969) abgeschätzt werden. Die Annahme einer höheren Porosität n_F liegt auf der sicheren Seite bei der Ermittlung des zulässigen Korndurchmessers d_{15F} .
- Die Ungleichförmigkeit kann anhand der Empfehlungen MAK (2013) für den Einbau unter Wasser mit $U_F \leq 5$ zur Reduzierung der Segregation gewählt werden. Die Lagerungsdichte D_F sollte für die Bemessung auf der sicheren Seite mit einer lockeren Lagerung angenommen werden.
- Aus den Empfehlungen nach CEM (2008) und MAK (2013) sowie aus den Laborexperimenten dieser Studie (mit einer Schichtdicke von $SD_F = 0,4 \text{ m}$) ergibt sich eine Mindestdicke des Mischkornfilters ($U_F > 5$) zu $SD_F \geq 0,5 \text{ m}$ unter Berücksichtigung der Unsicherheiten beim Einbau unter Wasser.
- Eine ausreichend hohe Filterauflast $p_A \geq 30 \text{ kN/m}^2$ ist erforderlich, um die hydraulische Filterstabilität unter dem Einfluss hoher hydraulischer Gradienten zu gewährleisten. Eine geringere Auflast reduziert den kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} und erfordert ein geringeres Abstandsverhältnis $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$.
- Die Prüfung der Durchlässigkeit des Filtermaterials $k_{f,F}$ und die Ermittlung des maximalen welleninduzierten hydraulischen Gradienten i_{max} erfolgt iterativ.
- Die Überprüfung der ausreichenden Durchlässigkeit des Filtermaterials $k_{f,F}$ im Verhältnis zur Durchlässigkeit des Basismaterials ist ebenfalls erforderlich, um dem Aufbau des Porenwasserüberdrucks entgegenzuwirken (siehe Abschnitt 2.1.4).
- Bei hohen hydraulischen Einwirkungen und erhöhten Sicherheitsanforderungen kann die Anwendung geometrischer Filterkriterien erforderlich werden (siehe Abschnitt 7.2.2).

Das Vorgehen der hydraulischen Bemessung wird anhand des Fließschemas in Abbildung 7.15 in vier Hauptschritten verdeutlicht (siehe auch Anhang E):

- (1) Ermittlung der lokalen Wellenparameter (H , h , T und L)
- (2) Berechnung des maximalen hydraulischen Gradienten i_{max} an der Schichtgrenze
- (3) Ermittlung des zulässigen Abstandsverhältnisses $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$ zwischen Basis- und Filtermaterial
- (4) Überprüfung der Durchlässigkeit des Filtermaterials $k_{f,F}$ (ggf. Iteration mit Schritt 2 bis 4)

Abb. 7.15: Vorgehen für die Berechnung des zulässigen Abstandsverhältnisses d_{15F}/d_{50B}

Ein Bemessungsdiagramm ist in Anhang E (Abbildung E.1) mit einem Bemessungsbeispiel dargestellt. In diesem Beispiel ergibt sich ein zulässiger Korndurchmesser des Filtermaterials $d_{15F} \leq 2,6$ mm bei einer gewählten Ungleichförmigkeit von $U_F = 5$. Zur Einordnung dieses Ergebnisses mit üblichen geometrischen Filterkriterien ergibt sich für das untersuchte Basismaterial ($d_{85B} = 0,269$ mm) folgendes Abstandsverhältnis (basierend auf dem Ansatz nach Terzaghi):

$$\frac{d_{15F}}{d_{85B}} = 9,7 \quad (7.14)$$

Das Berechnungsbeispiel aus Abbildung E.1 zeigt, dass der Filter nach hydraulischen Kriterien unter den gegebenen Randbedingungen mit $d_{15F}/d_{50B} \leq 10$ ein deutlich größeres Abstandsverhältnis (Gleichung 7.14) und damit ein wirtschaftlicheres Ergebnis (durch Reduzierung der erforderlichen Filterstufen) im Vergleich zu üblichen geometrischen Kriterien liefert (z. B. nach CEM (2008): $d_{15F}/d_{85B} \leq 4$). Weitere Vergleiche mit geometrischen Filterkriterien werden in Abschnitt 7.2.2 angestellt.

7.2.2 Geometrische Filterkriterien

Die geometrischen Filterkriterien werden zum Erreichen folgender Ziele hergeleitet und diskutiert: (i) Verbesserung des Verständnisses der vorhandenen Kriterien durch Einordnung der Ergebnisse dieser Arbeit, (ii) Vergleich vorhandener Kriterien für gleichgerichtete und oszillierende Strömung und (iii) Zusammenfassung und Bewertung des weiteren Forschungsbedarfs zur geometrischen Filterbemessung.

Ein geometrisch geschlossener Filter ist bedingt durch die geschlossenen Porenkanäle unabhängig von der hydraulischen Belastung geometrisch (statisch) stabil und es kann kein Transport der tragenden Bodenmatrix des Basismaterials im Porenraum des Filters erfolgen. Ein Vergleich verschiedener geometrischer Kriterien aus Regelwerken im Küsteningenieurwesen (siehe Abschnitt 2.1.4) verdeutlicht, dass die Anwendung dieser Filterkriterien unter oszillierender Strömung zu Abstandsverhältnissen im Bereich von geometrisch offenen Filtern führen kann (Abbildung 7.16).

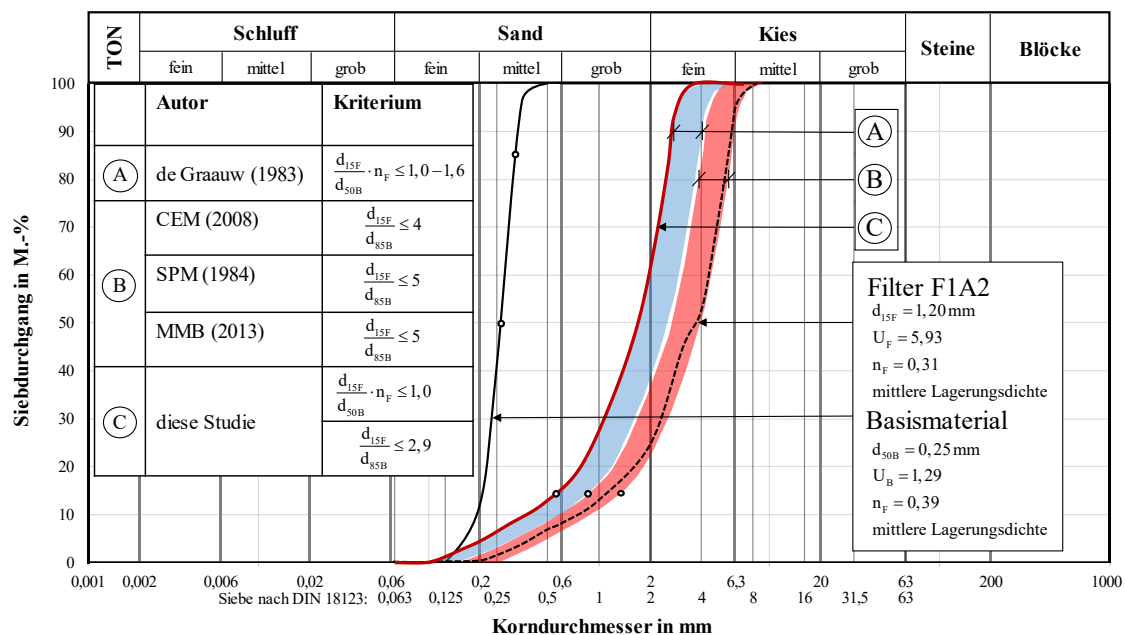


Abb. 7.16: Vergleich verschiedener geometrischer Filterkriterien für oszillierende Strömungen am Beispiel des untersuchten Basis- und Filtermaterials (F1A2, $d_{50B} = 0,25$ mm; $U_B = 1,29$; $d_{15F} = 1,20$ mm; $U_F = 5,93$)

Die Kornverteilungen werden entsprechend der idealisierten Form der Filterkonfiguration F1A2 anhand des Korndurchmessers d_{15F} bei gleicher Ungleichförmigkeit $U_F = 5,93$ parallel verschoben, um die verschiedenen Abstandsverhältnisse vergleichend darzustellen. Aus dem Vergleich der verschiedenen geometrischen Filterkriterien in Abbildung 7.16 lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Die geometrische Stabilität konnte in den Laborexperimenten bis zu sehr hohen Gradienten an der Schichtgrenze von $i_{\max(6,5)} = 24,5$ nachgewiesen werden und zeigt, dass ein sehr striktes Kriterium nach Gleichung 7.9 erforderlich ist, um tatsächlich eine Filterstabilität unabhängig von der hydraulischen Einwirkung zu erreichen. Das geometrische Kriterium wird nach Gleichung 7.10 mit dem Abstandsverhältnis (d_{15F}/d_{85B}) und der Porosität n_F angegeben.
- Im Vergleich der geometrischen Kriterien basierend auf dem Kriterium nach Terzaghi ergibt sich für Porositäten $n_F = 0,30$ bis $0,40$ ein geringeres Abstandsverhältnis:

$$\frac{d_{15F}}{d_{85B}} \leq 2,2 - 3,0 \quad (7.15)$$

gegenüber SPM (1984) mit $d_{15F}/d_{85B} \leq 5$ und CEM (2008) $d_{15F}/d_{85B} \leq 4 - 5$.

- Die Anwendung von geometrischen Filterkriterien, die unter gleichgerichteter Strömung und für sehr gleichförmiges Basis- und Filtermaterial hergeleitet wurden, führt unter ozillierender Strömung zu geometrisch offenen Filtern und erfordert damit eine hydraulische Bemessung.
- Die geometrische Filterstabilität kann unter welleninduzierter Strömung (bei ausreichender Filterauflast) nach Gleichung 7.9 und 7.10 mit einem sehr geringen Abstandsverhältnis erreicht werden. Die Anwendung der geometrischen Filterkriterien aus Gleichung 7.9 und 7.10 führt unter Umständen zu einem unwirtschaftlichen Filteraufbau (mit mehreren Filterlagen) und ist sinnvoll, wenn eine statische Stabilität (ohne Verformung des Filters) bei sehr hoher oder unbekannter hydraulischer Einwirkung erforderlich wird.

7.3 Zusammenfassung der Bemessungsansätze und -kriterien

Wichtige neue Ergebnisse konnten zur Stabilität von Kornfiltern unter welleninduzierter Strömung zur Herleitung von geometrischen und hydraulischen Stabilitätskriterien gewonnen werden. Die wichtigsten Ergebnisse zur Modellbildung der hydraulischen Filterbemessung sowie die Modelleffekte, Einschränkungen und für die Anwendbarkeit werden in diesem Abschnitt in drei Hauptpunkte unterteilt:

- a) Modellbildung des maßgebenden (welleninduzierten) hydraulischen Gradienten i_{\max} an der Schichtgrenze mit Hilfe der numerischen Untersuchungen mit dem Modell *geotechFoam* nach El Safti (2015) (Abschnitt 7.1.1)
- b) Modellbildung des kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} zum Bewegungsbeginn infolge der Kontakterosion durch die Laborexperimente in der Wechseldurchströmungsanlage (Abschnitt 7.1.2)
- c) Hydraulische (Abschnitt 7.2.1) und geometrische Filterkriterien (Abschnitt 7.2.2) unter welleninduzierter Strömung

Die wichtigsten Ergebnisse der Modellbildung tragen wesentlich zur Verbesserung des Prozessverständnisses bei und sind zur geometrischen und hydraulischen Bemessung in der Baupraxis von Bedeutung.

Modellbildung des maßgebenden hydraulischen Gradienten i_{\max}

Mit dem Ziel, den Zusammenhang zwischen Wellenparametern und dem maximalen hydraulischen Gradienten i_{\max} an der Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial herzustellen, haben die Laborexperimente und die numerischen Untersuchungen folgende Ergebnisse erbracht:

- Als wichtigste Einflussgrößen der welleninduzierten Einwirkung auf den maßgebenden hydraulischen Gradienten wurden durch Regressionsanalysen der numerischen Ergebnisse der Brechindex H/h und der einwirkende Gradient I' an der Oberkante des Filters ermittelt.
- Der funktionale Zusammenhang ist somit zwischen dem hydraulischen Gradienten i_{\max} an der Schichtgrenze und den Wellenparametern (Wellenhöhe H , Wellenperiode T und Wellenlänge L in Wassertiefe h unter der Annahme des Wellendrucks nach linearen Wellentheorie) für verschiedene Durchlässigkeiten des Filtermaterials $k_{f,F}$ hergestellt worden.
- Dieser Ansatz liefert einen wichtigen Beitrag zur hydraulischen Bemessung von Kornfiltern und bedarf weiterer Untersuchungen zum Einfluss (i) der hydraulischen Einwirkungen nichtlinearer Wellen, (ii) der Wellenlänge und Wellenperiode außerhalb des untersuchten Bereichs ($T = 7,25$ s bis $14,0$ s) sowie (iii) der Schichtdicke, der Auflast und des Fließwiderstands der Filterschicht auf die Porenwasserdruckverteilung und den hydraulischen Gradienten der Schichtgrenze.

Modellbildung des kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit}

- Die Modellbildung der kritischen hydraulischen Gradienten wurde durch die Grenzen zwischen den Bereichen der statischen Stabilität, des Bewegungsbeginns und des instabilen Zustands beschrieben, um eine hydraulische Bemessung auf der sicheren Seite, bis zur Grenze des Bewegungsbeginns und zusätzlich bis zum Maximum des dynamischen Verhaltens durchführen zu können.

- Es konnte der Zusammenhang zwischen charakteristischen Korngrößen des Basis- und Filtermaterials mit dem zuvor ermittelten hydraulischen Gradienten i_{\max} an der Schichtgrenze hergestellt werden. Hierzu konnte die Porosität n_F mit der Lagerungsdichte D_F und der Ungleichförmigkeit U_F des Filtermaterials mit dem Ansatz nach Beyer und Schweiger (1969) in diesen Zusammenhang einbezogen werden.
- Die Ansätze nach Ziems (1968) und de Graauw et al. (1983) zur vertikalen schichtorthogonalen Strömung konnten durch die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigt und erweitert werden. Es wird die geringere Filterstabilität unter oszillierender Strömung in dieser Studie im Vergleich zu gleichgerichteter Strömung (unter Anwendung des Ansatzes nach Ziems (1968)) deutlich.

Filterkriterien unter welleninduzierter Strömung

Hydraulische Filterkriterien

- Es haben sich hydraulische Stabilitätskriterien auf der Grundlage des Abstandsverhältnisses $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$ (Gleichung 7.7) und $d_{15F}/d_{85B} \cdot n_F$ (Gleichung 7.8) zur Beschreibung des kritischen hydraulischen Gradienten unter oszillierender Strömung aufgrund der guten Anpassung an die untersuchten Filtermaterialien und im Vergleich zu den Ansätzen nach Ziems (1968) und de Graauw et al. (1983) als besonders geeignet herausgestellt.
- Durch die hergeleiteten Bemessungsansätze können zwei Bemessungskonzepte verfolgt werden: (i) statische Filterstabilität (zusätzliche Sicherheiten werden berücksichtigt) mit geometrischen und hydraulischen Stabilitätskriterien und (ii) dynamische Stabilitätskriterien (geringe anfängliche Bewegungen sind zulässig) mit hydraulischen Stabilitätskriterien.
- Die hydraulische Bemessung führt im gezeigten Beispiel in Anhang E.1 zu einem zulässigen Abstandsverhältnis von $d_{15F}/d_{85B} = 9,6$ (mit $n_F = 0,36$) und bietet damit einen wesentlich wirtschaftlicheren Aufbau im Vergleich zu geometrischen Kriterien (z. B. nach CEM (2008) $d_{15F}/d_{85B} = 4$ bis 5) mit gleichzeitig höherer Unsicherheit bei unbekannter hydraulischer Belastung.

Geometrische Filterkriterien

- Zu beiden Abstandsverhältnissen ($d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$ und $d_{15F}/d_{85B} \cdot n_F$) wurden ebenfalls geometrische Kriterien für oszillierende Strömung abgeleitet.
- Ein Vergleich vorhandener Filterkriterien für oszillierende Strömungen zeigt, dass in dieser Studie wesentlich geringere Abstandsverhältnisse zum Erreichen der geometrischen Filterstabilität erforderlich sind: $d_{15F}/d_{85B} \leq 3$ (mit $n_F = 0,4$) im Vergleich zu CEM (2008): $d_{15F}/d_{85B} \leq 4$ bis 5
- Eine Bemessung mit geometrischen Filterkriterien führt unter Umständen zu unwirtschaftlichen (mehrstufigen) Filteraufbauten, daher sind hydraulische Kriterien den geometrischen Kriterien vorzuziehen.

Die Ergebnisse in diesem Kapitel leisten wichtige Beiträge (i) zur Verbesserung des Prozessverständnisses der hydraulischen Filterstabilität, (ii) zur Beschreibung des maßgebenden welleninduzierten hydraulischen Gradienten und (iii) zur geometrischen und hydraulischen Stabilität von Kornfiltern unter Berücksichtigung des Abstandsverhältnisses (d_{15F}/d_{50B}) und der Porosität n_F . Mit diesen Ergebnissen konnten geometrische und hydraulische Kriterien zur Filterstabilität unter welleninduzierter Strömung senkrecht zur Schichtgrenze einer horizontalen Filterschicht hergeleitet werden.

Aus der Diskussion der Ergebnisse in Abschnitt 7.1 ergeben sich Einschränkungen für die Anwendbarkeit der hydraulischen Filterkriterien (in Abschnitt 7.2) in Bezug auf das untersuchte Basis- und Filtermaterial, den hydraulischen Randbedingungen und den verwendeten Modellen.

Der maßgebende hydraulische Gradient ergibt sich aus den numerischen Untersuchungen auf der Grundlage des Wellendrucks nach linearer Wellentheorie mit dem volldynamischen Ansatz nach Biot gekoppelt mit dem linearen Darcy-Modell und einem linear elastischen Bodenmodell, sodass weitere Untersuchungen zu nichtlinearen Effekten der hydraulischen Einwirkung erforderlich werden. Hierzu sind numerische Parameterstudien mit einem erweiterten Modell unter Berücksichtigung folgender Modellansätze erforderlich: (i) der Druckrandbedingungen aus Wellentheorien höherer Ordnung, (ii) der erweiterten Darcy-Forchheimer-Gleichung nach Polubarinova-Kochina (1962) und (iii) nichtlineare Elastizitäts- und Plastizitätsmodelle.

Der kritische hydraulische Gradient unter oszillierender Strömung ergibt sich aus den hydraulischen Laboruntersuchungen mit der Wechseldurchströmungsanlage. Im Vergleich des Widerstands der Kornfilter nach de Graauw et al. (1983) mit den eigenen Ergebnissen wird eine gute Übereinstimmung erreicht, sodass die bisherigen Ansätze nach de Graauw et al. (1983) um höhere hydraulische Gradienten und weitere Kombinationen des Basis- und Filtermaterials erweitert werden. Es bedarf jedoch weiterer Untersuchungen zum Einfluss der Filterauflast, des Sättigungsgrades und der Porosität auf den kritischen hydraulischen Gradienten zum Bewegungsbeginn infolge der Kontaktersion, um vorhandene Kriterien zu verbessern und zu erweitern.

8 Zusammenfassung, Bewertung und Ausblick

Diese Studie wird vor dem Hintergrund der hydraulischen Filterbemessung von Kornfiltern in marinen Bauwerken mit folgenden Hauptzielen durchgeführt: (i) Verbesserung des Prozessverständnisses zur Interaktion der bodenmechanischen und geohydraulischen Prozesse sowie Erosionsprozessen im Filteraufbau, (ii) Beschreibung der Porenwasserdruckverteilung, der Filtergeschwindigkeit und des Fließwiderstands unter oszillierender Strömung, (iii) Erfassung der kritischen hydraulischen Gradienten als Grenzbedingung der Filterstabilität sowie (iv) Modellbildung und Herleitung von generischen Ansätzen zur Bemessung der hydraulischen Filterstabilität. In diesem Zusammenhang wird zunächst der aktuelle Wissensstand analysiert, um vorhandene Wissenslücken festzustellen. Ein neuer Versuchsaufbau wird entwickelt und erstmals zusammen mit der Wechseldurchströmungsanlage in Betrieb genommen. Systematische Modellversuche zur Ermittlung der hydraulischen Filterstabilität unter (welleninduzierter) oszillierender Strömung werden hiermit durchgeführt. Die Modellversuche werden zur Analyse (i) bodenmechanischer Prozesse und Erosionsprozesse, (ii) geohydraulischer Prozesse, (iii) geometrischer und hydraulischer Filterstabilität sowie deren Interaktion genutzt.

Zur Erweiterung und Verbesserung der Ergebnisse aus den Laborexperimenten mit der Wechseldurchströmungsanlage werden zusätzlich numerische Untersuchungen mit dem validierten Modell *geotech-Foam* nach El Safti (2015) durchgeführt. Dadurch wird die Analyse folgender Einflüsse auf die Filterstabilität ermöglicht: (i) Modelleffekte der hydraulischen Prozesse in den Laborexperimenten, (ii) Schichtdicke, Sättigung, Porosität und Durchlässigkeit des Basis- und Filtermaterials und (iii) maßgebender hydraulischer Gradient unter dem Einfluss der welleninduzierten Einwirkung im stabilen Filterzustand.

Die wichtigsten Ergebnisse werden in Abschnitt 8.1 für die Schlussfolgerungen mit Ausblick des Weiteren Forschungsbedarfs in Abschnitt 8.2 zusammengefasst bewertet.

8.1 Zusammenfassung und Bewertung der wichtigsten Ergebnisse

Mit dem Ziel hydraulische Kriterien für die Stabilität von Kornfiltern in Sohlsicherungen unter der Einwirkung von Wellen zu entwickeln, werden die Zielsetzung und das Vorgehen der Arbeit durch eine umfangreiche Wissensstandsanalyse präzisiert. Weiterhin liefern Vorversuche und theoretische Überlegungen erste Ergebnisse zur Weiterentwicklung und Verbesserung der Methodik.

Die wichtigsten Ergebnisse, Prozesse und deren Interaktion werden wie folgt zusammengefasst und bewertet:

- bodenmechanische Prozesse und Erosionsprozesse (Abschnitt 8.1.1)
- geohydraulische Prozesse (Abschnitt 8.1.2)
- hydraulische und geometrische Filterkriterien (Abschnitt 8.1.3)

8.1.1 Bodenmechanische Prozesse und Erosionsprozesse

Spannungen und Verformungen: Die bodenmechanischen Prozesse beinhalten die Bodenspannungen und -verformungen unter dem oszillierenden Porenwasserdruck (aus welleninduzierter Strömung) bei konstanter Filterauflast. Durch die Analyse der vertikalen Verformung der Filteroberkante und der Siebanalyse einzelner Schichten des Basis- und Filtermaterials wird der Zusammenhang zwischen der vertikalen Verformung und der Filterstabilität hergestellt. Zur Verbesserung des Verständnisses der hydraulischen und dynamischen Filterstabilität führt diese Analyse zusammen mit der Videoanalyse zu folgenden wichtigen Ergebnissen: (i) Herstellung des funktionalen Zusammenhangs zwischen vertikaler Verformung, Bewegungsbeginn und Versagen des Filters, (ii) Ermittlung des Bewegungsbeginns sowie der Grenzen zwischen statisch stabilem und instabilem Filterzustand anhand des kritischen hydraulischen Gradienten und (iii) Bestimmung der dynamischen Änderung der Filterstabilität durch Umlagerungsprozesse (Kontakterosion, Infiltration und Suffosion).

Filterstabilität und Erosionsprozesse: Es wird ein Zusammenhang zwischen der vertikalen Verformung an der Filteroberkante und der Kontakterosion an der Schichtgrenze zur Bewertung der hydraulischen Filterstabilität anhand der Geschwindigkeit der Verformung $\Delta s/\Delta t$ (in mm/min) hergestellt. Zur Definition der Grenzen zwischen statischer und dynamischer Filterstabilität werden die kritischen hydraulischen Gradienten ermittelt.

Erosion und Infiltration: Die Interaktion zwischen geohydraulischen Prozessen und Erosionsprozessen wird zur Verbesserung des Prozessverständnisses mit den Laborexperimenten systematisch untersucht. Die Erosion des Basismaterials an der Schichtgrenze zum Filter führt zu Infiltration des feineren Basismaterials in den Porenraum des Filters. Die visuellen Beobachtungen und die Messung der vertikalen Verformung werden durch die Zunahme des Fließwiderstands bestätigt und lassen auf Änderung der Haufwerkseigenschaften (Zunahme des Feinanteils im Filtermaterial, der Ungleichförmigkeit und Lagerungsdichte sowie Abnahme der Porosität) schließen. Somit nimmt der Fließwiderstand im Filter durch die Erosion zu, wodurch der hydraulische Gradient abnimmt und somit zu einer Reduktion der Erosion führt. Diese Interaktion bewirkt bei unveränderter hydraulischer Einwirkung die Selbstheilung des Filters. Dieser Prozess kann bei unveränderter hydraulischer Einwirkung zu einer dynamischen Stabilität des hydraulisch offenen Filters führen.

8.1.2 Geohydraulische Prozesse

Fließwiderstand im Filteraufbau: Die Interaktion zwischen geohydraulischen Prozessen und der Filterstabilität erfordert die Untersuchung der hydraulischen Prozesse im Filteraufbau im stabilen Zustand des Filters. Hiermit wird die Störung der hydraulischen Prozesse durch den Einfluss der Materialbewegungen/-umlagerungen substantiell reduziert. Hierdurch werden Einflüsse der Haufwerkseigenschaften (Feinanteil, Porosität und Lagerungsdichte) auf den Fließwiderstand reduziert.

Der Fließwiderstand wird durch die Forchheimer-Gleichung mit den Forchheimer-Koeffizienten a und b beziehungsweise der zugehörigen Widerstandskoeffizienten α und β für oszillierende Strömung in den untersuchten Filtermaterialien ($d_{15F} = 0,6$ bis $2,7$ mm; $d_{60F}/d_{10F} = 2,3$ bis $6,6$; $n_F = 0,31$ bis $0,35$) beschrieben. Zur Ermittlung der Widerstandskoeffizienten α und β und zum Vergleich der Widerstandskoeffizienten aus der Literatur ist die Betrachtung des Strömungsregimes anhand der kornbezogenen Reynolds-Zahl Re^* im Zusammenhang mit der Porengeometrie, den Fluideigenschaften und den Bodenspannungen erforderlich. In dieser Studie wird der Fließwiderstand als wichtiger Beitrag zur numerischen Modellierung von oszillierenden Strömungen in porösen Medien (Sand-Kies) mit folgenden Widerstandskoeffizienten ermittelt (Tabelle 6.4):

$\alpha = 43$ bis 264 ; $\beta = 0,7$ bis $3,0$ (mit $d_c = d_{15F}$)

Die kornbezogene Reynolds-Zahl Re^* ergibt sich durch die relativ geringe Durchlässigkeit des Basismaterials ($k_{fB} \approx 3,8 \cdot 10^{-4}$ m/s) und durch die resultierende Filtergeschwindigkeit v_f im Bereich $Re^* = 0,9$ bis $4,6$ (mit $d_c = d_{10F}$).

8.1.3 Geometrische und hydraulischen Filterstabilität

Welleninduzierter hydraulischer Gradient (Abschnitt 7.1.1): Durch die systematische Analyse der bodenmechanischen und geohydraulischen Prozesse wird das Prozessverständnis zur Modellbildung der hydraulischen Filterstabilität wesentlich verbessert (Abschnitt 8.1.1 und 8.1.2). Hieraus ergibt sich der funktionale Zusammenhang zwischen den maßgebenden Wellenparametern (Wellenhöhe H und Wellenperiode T in Wassertiefe h) und dem maßgebenden hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze i_{max} nach Gleichung 7.3. Hierbei zeigt sich der Einfluss der Durchlässigkeit des Filtermaterials k_{fF} auf den maßgebenden hydraulischen Gradienten i_{max} , wodurch eine iterative Berechnung zur Ermittlung des zulässigen Abstandsverhältnisses erforderlich wird.

Kritischer hydraulischer Gradient (Abschnitt 7.1.2): Der Vergleich der kritischen hydraulischen Gradienten dieser Studie mit den Untersuchungen nach Ziems (1968) und de Graauw et al. (1983) ergibt den besten funktionalen Zusammenhang zwischen dem kritischen hydraulischen Gradienten und den Abstandsverhältnissen $d_{15F}/d_{50B} \cdot n_F$ und $d_{15F}/d_{85B} \cdot n_F$. Ebenfalls können die untersuchten Basismaterialien nach de Graauw et al. (1983) ($d_{50B} = 0,15$ mm und $0,55$ mm) mit den untersuchten Basismaterialien in dieser Studie ($d_{50B} = 0,25$ mm) mit guter Übereinstimmung (mit einer relativen Abweichung $\Delta x = 4$ % bis 14 %) erweitert werden.

Hydraulische Filterstabilität unter oszillierender Strömung (Abschnitt 7.2.1): Unter der Einwirkung (aufwärts) gleichgerichteter Strömung wird eine deutlich höhere Stabilität gegenüber oszillierender Strömung mit der Amplitude des hydraulischen Gradienten in gleicher Größenordnung festgestellt. Dieses Verhalten wird (bei Abstandsverhältnissen von $d_{15F}/d_{85B} \cdot n_F = 1,5$ bis $6,0$) durch geringere kritische hydraulische Gradienten (unter oszillierender Strömung) bestätigt. Im Vergleich dieser Studie zu den Untersuchungen nach Ziems (1968) (unter gleichgerichteter Strömung) werden um bis zu 32 % gerin-

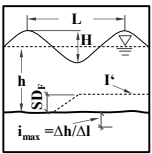
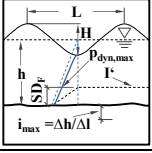
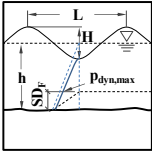
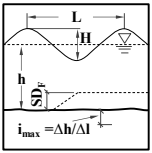
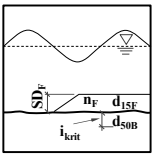
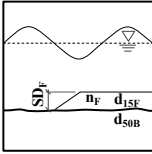
gere kritische hydraulische Gradienten ermittelt. Diese geringere Stabilität ist vor allem durch das Ausbleiben der Brückenbildung des Basismaterials im Porenraum des Filters unter oszillierender Strömung zu begründen. Weitere Gründe liegen in der Zunahme des Porendurchmessers, der Porosität und Abnahme der effektiven Spannungen im Verlauf einer Periode des oszillierenden Porenwasserdrucks. Der periodische Prozess der Kontakterosion wird in den Laborexperimenten durch die vertikale Verformung der Filterschicht beobachtet.

Geometrische Filterstabilität unter oszillierender Strömung (Abschnitt 7.2.2): Durch die geringere Filterstabilität unter oszillierender Strömung (im Vergleich zu gleichgerichteter Strömung) ergibt sich gegenüber dem Kriterium nach de Graauw et al. (1983) ein sehr geringes zulässiges Abstandsverhältnis zur Erreichung eines geometrisch geschlossenen Filters, bei dem die Stabilität unabhängig von der hydraulischen Einwirkung ist (Abschnitt 7.2.2):

$$\frac{d_{15F}}{d_{50B}} \cdot n_F \leq 1,0 \quad (7.9)$$

Die Ergebnisse dieser Studie verdeutlichen die besondere Bedeutung der Filterstabilität unter oszillierender Strömung in Hinblick auf geringere kritische hydraulische Gradienten und geringere Abstandsverhältnisse zum Erreichen einer hydraulischen Stabilität (Gleichung 7.12) und einer geometrischen Stabilität (Gleichung 7.9) gegenüber gleichgerichteter Strömung. Gleichzeitig werden Ansätze zur Ermittlung des maßgebenden welleninduzierten hydraulischen Gradienten sowie des kritischen hydraulischen Gradienten in Abhängigkeit des Abstandsverhältnisses (d_{15F}/d_{50B} ; d_{15F}/d_{85B}) und der Porosität n_F des Filtermaterials entwickelt (Abschnitt 7.2.1).

Tab. 8.1: Übersicht der wichtigsten Formeln zur Ermittlung der Filterstabilität

Parameter	Beschreibung	Gleichung	Nr.
	Maximaler hydraulischer Gradient an der Schichtgrenze i_{\max} unter Berücksichtigung des einwirkenden Gradienten I' an der Filteroberkante mit a_k nach Tab. 7.3	$i_{\max(6,5)} = a_k \cdot I'$	(7.2)
	Einwirkender Gradient I' unter Berücksichtigung des maximalen dynamischen Druckanteils $p_{\text{dyn,max}}$	$I' = \frac{p_{\text{dyn,max}}}{\Delta l \cdot \rho \cdot g}$	(7.3)
	Maximaler dynamischer Druckanteil $p_{\text{dyn,max}}$ unter Berücksichtigung der Wellenhöhe H , Wellenlänge L , Wassertiefe h und der Schichtdicke des Filters SD_F	$p_{\text{dyn,max}} = \rho \cdot g \cdot \frac{H}{2} \cdot \frac{\cosh\left(\frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot SD_F\right)}{\cosh\left(\frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot h\right)}$	(7.4)
	Maximaler hydraulischer Gradient an der Schichtgrenze i_{\max} unter Berücksichtigung der Wellenparameter (Wellenhöhe H , Wellenlänge L , Wassertiefe h) da $SD_F \ll L \rightarrow \cosh(2\pi/L \cdot SD_F) \approx 1$	$i_{\max(6,5)} = \frac{a_k}{\Delta l} \cdot \frac{H}{2} \cdot \left[\cosh\left(\frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot h\right) \right]^{-1}$	(7.5)
	Kritischer hydraulischer Gradient i_{krit} unter Berücksichtigung der Porosität des Filters n_F und des Abstandsverhältnisses d_{15F}/d_{50B} ($a_{D,50}$ nach Tabelle 7.5)	$i_{\text{krit}} = a_{D,50} \cdot \left(\frac{d_{15F}}{d_{50B}} \cdot n_F \right)^{b_{D,50}}$	(7.7)
		$i_{\text{krit}} = a_{D,85} \cdot \left(\frac{d_{15F}}{d_{85B}} \cdot n_F \right)^{b_{D,85}}$	(7.8)
	Geometrisches Filterkriterium für sehr hohe hydraulische Einwirkung ($i > 5$) unter oszillierender Strömung	$\frac{d_{15F}}{d_{50B}} \cdot n_F \leq 1,0$	(7.9)
		$\frac{d_{15F}}{d_{85B}} \cdot n_F \leq 0,9$	(7.10)
H	[m]	Lokale Wellenhöhe	
L	[m]	Lokale Wellenlänge	
h	[m]	Wassertiefe	
SD_F	[m]	Schichtdicke des Filters	
Δh	[m]	Druckhöhendifferenz	
Δl	[m]	Sickerweg	
i_{\max}	[-]	Maximaler hydraulischer Gradient (Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial)	
I'	[-]	Einwirkender Gradient an der Filteroberkante	
a_k	[-]	Empirischer Parameter unter dem Einfluss der Filterdurchlässigkeit	
$p_{\text{dyn,max}}$	[N/m²]	Maximaler dynamischer Druckanteil	
i_{krit}	[-]	Kritischer hydraulischer Gradient (Schichtgrenze zwischen Basis- und Filtermaterial)	
$a_{D,i}$	[-]	Empirischer Parameter der Filterstabilität (nach Tabelle 7.5)	
$b_{D,i}$	[-]	Empirischer Parameter der Filterstabilität (nach Tabelle 7.5)	
$d_{i,F}$	[m]	Korndurchmesser des Filtermaterials bei i % Massendurchgang	
$d_{i,B}$	[m]	Korndurchmesser des Basismaterials bei i % Massendurchgang	
n_F	[-]	Porosität des Filtermaterials	

8.2 Diskussion und Ausblick

Die Analyse des Schrifttums, der theoretischen, numerischen und hydraulischen Untersuchungen führt zu neuen Fragestellungen hinsichtlich der hydraulischen Bemessung von Kornfiltern unter welleninduzierter Strömung. Detaillierte Diskussionen der Ergebnisse sowie der Anwendbarkeit und Einschränkungen (Modelleffekte) sind jeweils im Abschluss jeden Kapitels zusammengefasst.

Die durchgeführten Laborexperimente in der Wechseldurchströmungsanlage (WDA) und die numerischen Untersuchungen sind besonders zeitaufwendig und kostenintensiv, sodass nur eine Auswahl der maßgebenden Materialkombinationen und hydraulischen Einwirkungen untersucht werden kann. Durch die aufgezeigten Methoden, Ansätze, Modelle und den hierzu entstandenen offenen Fragestellungen bildet diese Studie eine Grundlage für die weitere Forschung. Im Folgenden werden die Anwendbarkeit und die Einschränkungen der Untersuchungsergebnisse für die Bemessung in der Baupraxis sowie der weitere Forschungsbedarf zu folgenden Punkten diskutiert:

- (i) Hydraulische Einwirkung und geohydraulische Prozesse
- (ii) Bodenmechanische Prozesse und Erosionsprozesse
- (iii) Geometrische und hydraulische Filterstabilität

Die Untersuchungen zur hydraulischen Filterstabilität unterliegen den Modelleffekten des hydraulischen Laborexperimentes (siehe Abschnitt 5.4) und den Modelleffekten des numerischen Modells (siehe Abschnitt 6.3.3). Die Anwendungsbereiche und Einschränkungen der hergeleiteten Stabilitätskriterien werden unter diesen Gesichtspunkten in diesem Abschnitt zusammengefasst und diskutiert.

(i) Hydraulische Einwirkung und geohydraulische Prozesse: Der welleninduzierte hydraulische Gradient i_{\max} , der als maßgebende Einwirkung des Kornfilters durch numerische Parameterstudien untersucht wurde, unterliegt folgenden Einflüssen:

- Die Randbedingungen in den Laborexperimenten und im numerischen Modell basieren auf dem Wellendruck nach linearer Wellentheorie unter Berücksichtigung regelmäßiger (sinusförmiger) Wellen (Abschnitt 7.1). Im Vergleich zur Ermittlung des Wellendrucks an der Sohle, kann die lineare Wellentheorie aufgrund der Annahme einer undurchlässigen Sohle nicht zur Ermittlung der vertikalen Strömungskomponente angewendet werden.
- Einer der wichtigsten Einflüsse auf den maximalen hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze i_{\max} ist die Druckrandbedingung an der Filteroberkante. Die Randbedingungen im Laborexperiment (WDA) und im numerischen Modell können für weitere Parameterstudien zur Erfassung der nichtlinearen Komponenten der dynamischen Druckverteilung mit Wellentheorien höherer Ordnung und für unregelmäßigen Seegang erweitert werden (siehe Abschnitt 4.6.2). Der Einfluss der Druckverteilung unter fortschreitenden Wellen nach Theorien höherer Ordnung sowie der Einfluss des unregelmäßigen Seegangs auf die Porenwasserdruckverteilung im Filteraufbau können durch großmaßstäbliche Modellversuche im Wellenkanal untersucht werden. Hierzu ist es zweckmäßig, zunächst die Strömungskomponenten (oszillierend und gleichgerichtet), Strömungsrichtung (vertikal/horizontal, schichtorthogonal/schichtparallel) einzeln und anschließend in verschiedenen Verhältnissen zueinander zu untersuchen. Die Untersuchungen dieser Studie beziehen sich ausschließlich auf die vertikale Komponente der Porenwasserströmung im Filteraufbau, daher ist es sinnvoll, die vorangegangenen Untersuchungen zur horizontalen Strömungskomponenten in Sohlsicherungen nach Adel et al. (1994), Bakker et al. (1994), Wolters et al. (2010), Wolters und van Gent (2012), Schendel et al. (2015)) und van de Sande et al. (2015) einzubeziehen, um die Grundlagen zur hydraulischen Filterstabilität unter

Berücksichtigung der Interaktion mehrerer Strömungskomponenten mit kritischen hydraulischen Parametern (Gradient, Filtergeschwindigkeit und Schubspannungsgeschwindigkeit) zu ermitteln. Anschließend können diese Grundlagen um die Strömungen in (geneigten) Böschungssicherungen nach Bezuijen et al. (1987) und van Gent und Wolters (2015) erweitert werden.

- Die Untersuchungen in einem Wellenkanal erfordern einen Tiefteil um eine ausreichende Schichtdicke des Basismaterials (Minstdicke $SD_B \geq 3,0$ m) zu gewährleisten und somit den Einfluss der undurchlässigen Sohle zu reduzieren (siehe Abschnitt 6.1.3).
- Der maßgebende hydraulische Gradient i_{\max} wird durch das (lineare) Darcy-Modell für das untersuchte Basis- und Filtermaterial hinreichend genau ermittelt (siehe Abschnitt 4.5). Die hydraulischen und numerischen Untersuchungen werden mit kornbezogenen Reynolds-Zahlen ($Re^* = v_f \cdot d_{15}/\nu < 45$) im Übergangsbereich zwischen dem Darcy- und Forchheimer-Fließzustand durchgeführt (siehe Abschnitt 6.2.1). Hierdurch ist die Anwendbarkeit der Ergebnisse für relativ feines Basis- und Filtermaterial ($d_{15B} \leq 0,25$ mm; $d_{15F} \leq 5,4$ mm) eingeschränkt. Im numerischen Modell werden daher nichtlineare Effekte, wie Trägheitseffekte und turbulente Fließwiderstände ausschließlich linear approximiert. Zur Berücksichtigung dieser nichtlinearen Effekte in porösen Medien mit hohen kornbezogenen Reynolds-Zahlen $Re^* > 150$ (zum Beispiel in grobem Kies mit hoher Durchlässigkeit $k_{fF} > 10^{-2}$ m/s) ist es erforderlich, das Darcy-Modell mit den gekoppelten volldynamischen Biots-Gleichungen um die erweiterte Darcy-Forchheimer-Gleichung zu ergänzen (Abschnitt 2.2.3). Die Übertragung des maßgebenden hydraulischen Gradienten auf gröbere Basis- und Filtermaterialien führt durch die fehlende Berücksichtigung der Trägheitskräfte zur Unterschätzung des Fließwiderstands. Ebenfalls entstehen Maßstabeffekte bei der Übertragung auf wesentlich feinere Materialien durch den Übergang zu schleichender Strömung ($Re^* \ll 1$).

(ii) Bodenmechanische Prozesse und Erosionsprozesse: Es besteht ein enger Zusammenhang zwischen effektiven Spannungen, Fließwiderstand und Filterstabilität:

- Die empirischen Stabilitätskriterien basieren auf einer konstanten relativ hohen Auflast des Filtermaterials. Weitere Untersuchungen zeigen eine Tendenz zu höheren hydraulischen Gradienten und einem geringeren Widerstand des Filters gegenüber der Kontakterosion bei abnehmender Filterauflast ($p_A = 15$ kN/m²). Es bedarf jedoch weiterer Forschung um diesen Einfluss systematisch untersuchen zu können und Stabilitätskriterien unter Berücksichtigung der Filterauflast herleiten zu können. Aus diesem Grund ist die Anwendbarkeit der hergeleiteten Stabilitätskriterien auf eine erforderliche Auflast von $p_A \geq 30$ kN/m² (durch ein Deckwerk oder weitere Filterschichten) begrenzt. Weiterhin ist die Stabilität gegenüber äußerer Erosion und die Einhaltung einer Minstdicke der Filterschicht von $SD_F = 0,40$ m eine Voraussetzung zur Anwendung der ermittelten Stabilitätskriterien (Abschnitt 7.1.2).
- Der Einfluss der Filterauflast auf die Bodenspannung an der Schichtgrenze, sowie die dynamische Änderung der Porengeometrie konnten in dieser Arbeit nicht abschließend untersucht werden, jedoch sollte die Auflast in weiteren Untersuchungen ohne Wandeinflüsse (wie Wandreibung und Spannungsübertragung) in einer größeren Versuchszelle in der Wechseldurchströmungsanlage getestet werden. Weiterhin unterliegt der kritische hydraulische Gradient i_{krit} zum Beginn der Kontakterosion dem Einfluss der Spannungsverteilung in der Versuchszelle. Durch Reibung werden Kräfte über die Wandung der Zelle übertragen, sodass die resultierende effektive Spannung an der Schichtgrenze hierdurch reduziert wird (siehe Abschnitt 5.2.3). Dieser Einfluss kann durch eine neue Versuchszelle mit einem relativ großen Innendurchmesser d_i im Verhältnis zur Schichtdicke des Filters SD_F ($d_i/SD_F \geq 3,2$ mit Reibungswinkel $\varphi = 32^\circ$) mit der Wechseldurchströmungsanlage und durch numerische Parameterstudien untersucht werden.

- Die Einflüsse der Filterauflast und der effektiven Spannungen auf die Verformung der Bodenmatrix werden im numerischen Modell durch ein lineares (isotropes) porenelastisches Bodenmodell im stabilen Zustand (ohne Materialumlagerung) beschrieben. Zur Untersuchung des dynamischen Verformungsverhaltens des Bodens unter dem Einfluss der Erosions- und Transportprozesse ist eine Erweiterung des Bodenmodells zur anisotropischen, heterogenen Verformung sowie zur Interaktion der geotechnischen Eigenschaften (Porosität n , Kompressionsmodul der Bodenmatrix K) erforderlich. Zur Entwicklung eines Bodenmodells bilden unter anderem die Ansätze nach Herle (1997) und Holler (2006) zur Hypoplastizität eine wichtige Grundlage (siehe Abschnitt 2.3.2). Die Interaktion zwischen Sättigungsgrad, Kompressibilität des Porenfluids und Porenwasserdruck können somit ebenfalls systematisch untersucht werden.
- Weiterhin bedarf es zusätzlicher Versuche mit der Wechseldurchströmungsanlage zur Filterstabilität unter dem Einfluss verschiedener Kornformen (gebrochen/ rundkörnig) und verschiedener Kornverteilungen (Ungleichförmigkeit, Krümmung), um die Charakteristik des Porenraums, der tragenden Bodenmatrix und der Verzahnung der Einzelkörner explizit zu berücksichtigen.

(iii) Geometrische und hydraulische Filterstabilität: Die hydraulischen Stabilitätskriterien werden aus den Ergebnissen zum maßgebenden (welleninduzierten) hydraulischen Gradienten i_{\max} (Abschnitt 7.1.1) und dem kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} (Abschnitt 7.1.2) hergeleitet. Zu den Stabilitätskriterien ergeben sich folgende Punkte zur Anwendbarkeit und Einschränkungen sowie zum Forschungsbedarf:

Geometrische Stabilitätskriterien: Der Widerstand eines geometrisch geschlossenen Filters ist unabhängig von der hydraulischen Einwirkung. Aus den numerischen Untersuchungen zu Wassertiefen von bis zu $h = 45$ m geht hervor, dass nach linearer Wellentheorie und nichtbrechenden Wellen ($H/h \leq 0,78$; $H/L \leq 0,142$) ein maximaler hydraulischer Gradient $i_{\max} \leq 3,1$ für den untersuchten Filteraufbau erreicht werden kann. In den Laborexperimenten werden sehr hohe hydraulische Gradienten von bis zu $i = 24$ bei relativ hoher Filterauflast von $p_A = 30 \text{ kN/m}^2$ ermittelt zu denen das Filtermaterial F1C1 ($d_{15F}/d_{85B} = 2,3$) ein geometrisch (statisch) stabiles Verhalten aufweist. Weitere systematische Untersuchungen sind zur Überprüfung des Einflusses der Filterauflast auf die geometrische Stabilität erforderlich. Außerdem besteht weiterer Forschungsbedarf zum maximalen hydraulischen Gradienten unter verschiedenen hydraulischen Einwirkung (zum Beispiel: unregelmäßiger Seegang, Druckschlagbelastung bei brechenden Wellen und kombinierte Strömungskomponenten).

Hydraulische Stabilitätskriterien: Die Filterbemessung kann deutlich durch Anwendung der Zuverlässigkeitstheorie verbessert werden, indem die statistische Verteilung der welleninduzierten Einwirkung aus unregelmäßigem Seegang und die Verteilung des Widerstands des Filters gegenüber dem einwirkenden hydraulischen Gradienten berücksichtigt werden. Die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit für die probabilistische Analyse von Kornfiltern erfordert einen großen Umfang weiterer hydraulischer und numerischer Untersuchungen. Die Anwendung von hydraulischen Kriterien in der Baupraxis benötigt grundsätzlich eine Aufbereitung und Implementierung in Bemessungsprogrammen und Leitfäden, um Gefährdungen durch Fehlinterpretationen und Unterdimensionierungen zu reduzieren sowie die Wirtschaftlichkeit durch Unterhaltungsmaßnahmen und Überdimensionierungen zu verbessern.

Die dynamische Filterstabilität birgt zusätzlich durch das Zulassen einer gewissen Umlagerung ein großes Potential zur wirtschaftlicheren Bemessung gegenüber geometrischen Bemessungskriterien (nach Bemessungsempfehlungen z. B. CEM (2008), CIRIA/CUR/CETMEF (2008)), insbesondere in Bereichen geringerer hydraulischer Einwirkung. Hierzu besteht weiterer Forschungsbedarf zur weiteren

Verbesserung des Prozessverständnisses der Interaktion zwischen den hydraulischen und bodenmechanischen Prozessen.

- Das dynamische Verhalten des Filteraufbaus nach dem Überschreiten des Bewegungsbeginns bedarf weiterer Laborexperimente mit der Wechseldurchströmungsanlage mit Langzeitversuchen und Wiederholungsversuchen, um verlässliche Kriterien der dynamischen Filterstabilität herleiten zu können.
- Durch die Ansätze nach Koenders und Williams (1992) zu Mehrphasenströmungen des Boden-Wasser-Gemisches bei lokaler Verflüssigung können mit Hilfe der Ergebnisse dieser Studie zu semi-stabilen Filtern weitere Modelle zur Simulation der dynamischen Prozesse entwickelt werden. Hierdurch können in weiteren Untersuchungen Bemessungsansätze für dynamische Filter (Sackungfilter) hergeleitet werden. Es ist dazu hilfreich bereits erhobene Daten weiterer Studien in Metastudien zusammenzuführen und in Hinblick auf die Grenzen der statischen und dynamischen Stabilität neu zu bewerten.
- Der Einfluss der Schichtdicke, Filterauflast, Porosität und Lagerungsdichte auf den Fließwiderstand im Filteraufbau und den hydraulischen Gradienten an der Schichtgrenze sowie auf die dynamische Stabilität (durch geringere Wahrscheinlichkeit des Durchdringens bei zunehmender Schichtdicke) bedarf weiterer Laborexperimente und numerischer Untersuchungen.
- Zur numerischen Modellierung der dynamischen Stabilität von Kornfiltern bedarf es weiterer Forschung zu folgenden Punkten:
 - Erweiterung und Kopplung der geohydraulischen Modelle mit bodenmechanischen Modellen, zur Modellierung des dynamischen Verhaltens des Fließwiderstands im Filteraufbau unter Berücksichtigung der zeitlichen Änderung der Porengeometrie durch Verformungen (Porosität, Lagerungsdichte, Feinanteil) und des Porenfluids (Viskosität, Sättigungsgrad, Kompressibilität)
 - Kopplung von makroskaligen geotechnischen und geohydraulischen Modellen mit mikroskaligen Partikelmodellen (z. B. DEM) zur Modellierung von Porenwasserströmungen, Bodenspannungen, Verformungen und Transportprozessen (siehe Abschnitt 2.3.2)
 - Korn-zu-Korn-Interaktion (unter Berücksichtigung der Bodenspannung und des Porenwasserdrucks) und Transportprozesse infolge der Kontakterosion, Infiltration, innerer und äußerer Suffosion

Durch die Verbesserung der vorhandenen Ansätze zur Ermittlung des welleninduzierten hydraulischen Gradienten und durch die Entwicklung dynamischer Stabilitätskriterien können zuverlässige und wirtschaftliche Bemessungskriterien für die Baupraxis hergeleitet werden.

Schrifttum

- Ackers, P.; White, W. R. (1973): Sediment Transport: New Approach and Analysis. In: *Journal of the Hydraulics Division* Vol. 99 (HY11), S. 2041–2060. Online verfügbar unter <https://trid.trb.org/view.aspx?id=103329>.
- Adel, H. den (1987): Herananalyse doorlatendheidsmetingen door middel van de Forchheimer relatie. Hg. v. In opdracht van [Ministerie van Verkeer en Waterstaat], Rijkswater staat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde. Grondmechanica Delft, Afdeling Waterbouwkundige Constructies. Delft (CO-272550/56). Online verfügbar unter <http://publicaties.minienm.nl/download-bijlage/64609/66091.pdf>, zuletzt geprüft am 18.05.2015.
- Adel, H. den; Koenders, M. A.; Bakker, K. J. (1994): The analysis of relaxed criteria for erosion-control filters. In: *Canadian Geotechnical Journal*, S. 829–840. DOI: 10.1139/t94-100.
- Alcérrec Huerta, J. C. (2014): Process-based modelling of waves interacting with porous bonded revetments and their sand foundation. Dissertation. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany. Leichtweiß-Institut für Wasserbau. Online verfügbar unter http://digisrv-1.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/receive/DocPortal_document_00057776.
- Andersen, O. H.; Gent, M. R. A. van; Meer, J. W. van der; Burcharth, H. F.; Adel, H. den (1992): Non-Steady Oscillatory Flow in Coarse Granular Materials. In: *Proceedings of Final Overall Workshop of Mast G6-s Coastal Structures*.
- Auriault, J.-L. (2008): On the Domain of Validity of Brinkman's Equation. In: *Springer Science+Business Media B.V. 2008*, S. 215–223. DOI: 10.1007/s11242-008-9308-7.
- Bakker, K. J.; Verheij, H. J.; Groot, M. B. de (1994): Design Relationship for Filters in Bed Protection. In: *Journal of Hydraulic Engineering* Vol. 120. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1994)120:9(1082).
- Bandara, S.; Soga, K. (2015): Coupling of soil deformation and pore fluid flow using material point method. In: *Computers and Geotechnics* 63, S. 199–214. DOI: 10.1016/j.compgeo.2014.09.009.
- Barends, F.B.J. (1994): Hydromechanics of Porous Media in the Maritime Environment. In: M. B. Abbott und W. A. Price (Hg.): *Coastal, Estuarial and Harbour Engineers' Reference Book*. Unter Mitarbeit von Chapman & Hall. First Edition. London/Glasgow, U.K., S. 425–438.
- Barree, R. D.; Conway, M. W. (2004): Beyond Beta Factors. A Complete Model for Darcy, Forchheimer, and Trans-Forchheimer Flow in Porous Media. In: SPE (Hg.): *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston, Texas, 26–29 September 2004.
- Barreiro, A. (2015): Smoothed Particle Hydrodynamics model for civil and coastal engineering applications. PhD Thesis. Universida de Vigo. Departamento de Física Aplicada, Environmental Physics Laboratory.
- Barreiro, A.; Crespo, A.J.C.; Domínguez, J. M.; Gómez-Gesteira, M. (2013): Smoothed Particle Hydrodynamics for coastal engineering problems. In: *Computers & Structures* 120, S. 96–106. DOI: 10.1016/j.compstruc.2013.02.010.
- Bear, J. (1972): Dynamics of fluids in porous media. In: *American Elsevier, New York*.
- Bear, J.; Corapcioglu, M. Y. (1984): *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*. N. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Beavers, G. S.; Joseph, D.D. (1967): Boundary conditions at a naturally permeable wall. In: *J. Fluid Mech.* Vol. 30, part 1, S. 197.
- Belyashevskii, N. N.; Bugai, N. G.; Kalantynenko, I. I.; Topchii, S. L. (1972): Behaviour and Selection of the Composition of Graded Filters in the Presence of a Fluctuating Flow. In: *Hydrotechnical Construction* (Vol. 6), S. 541–546.
- Bertram, G. E. (1940): An Experimental Investigation of Protective Filters. Harvard University, Graduate School of Engineering, Cambridge USA (Publ 267, Soil Mechanics Series, No. 7). Online verfügbar unter <https://trid.trb.org/view.aspx?id=124790>.
- Beyer, W. (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. In: *WWT* 14 (6), S. 165–168.

- Beyer, W.; Schweiger, K. H. (1969): Zur Bestimmung des entwässerbaren Porenanteils der Grundwasserleiter. In: *Wasserwirtschaft-Wassertechnik (WWT)* 19 (9), S. 57–60.
- Bezuijen, A.; Klein Breteler, M.; Bakker, K. J. (1987): Design Criteria for Placed Block Revetments and Granular Filters. In: Second International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries. CPOEDC87. Beijing, China, September 7–11, 1987.
- Biot, M. A. (1941): General theory of three-dimensional consolidation. In: *Journal of Applied Physics* vol. 12 (no.2), S. 155.
- Biot, M. A. (1955): Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid. In: *Journal of Applied Physics* vol. 26 (no.2), S. 182.
- Biot, M. A. (1956a): Theory of Deformation of a Porous Viscoelastic Anisotropic Solid. In: *J. Appl. Phys.* 27 (5), S. 459. DOI: 10.1063/1.1722402.
- Biot, M. A. (1956b): Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low-Frequency Range. In: *J. Acoust. Soc. Am.* 28 (2), S. 168. DOI: 10.1121/1.1908239.
- Biot, M. A. (1962): Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media. In: *Journal of Applied Physics* vol. 33 (no.4), S. 1483.
- Bourantas, G. C.; Loukopoulos, V. C. (2013): A meshless scheme for incompressible fluid flow using a velocity–pressure correction method. In: *Computers & Fluids* 88, S. 189–199. DOI: 10.1016/j.compfuid.2013.09.010.
- Boutt, D. F.; Cook, B. K.; McPherson, Brian J. O. L.; Williams, J. R. (2007): Direct simulation of fluid-solid mechanics in porous media using the discrete element and lattice-Boltzmann methods. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 112 (B10). DOI: 10.1029/2004JB003213.
- Brinkman, H. C. (1949): A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles. In: *Applied Science Research* 1 (1), S. 27.
- Bubel, J.; Grabe, U.-P. D.-I. J. (2015): Unterwasserböschungen in kohäsionslosen Böden unter Wellenbeanspruchung: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-662-45991-1_13.pdf.
- Burcharth, H. F.; Andersen, O. K. (1995): On the one-dimensional steady and unsteady porous flow equations. In: *Coastal Engineering* 24 (3–4), S. 233–257. DOI: 10.1016/0378-3839(94)00025-S.
- Busch, K.-F.; Luckner, L.; Tiemer, K. (1993): Lehrbuch der Hydrogeologie. Band 3: Geohydraulik. Berlin, Germany: Bornträger.
- Canelas, R. (2015): Numerical modeling of fully coupled solid-fluid flows. PhD Thesis. UNIVERSIDADE DE LISBOA, Lisbon, Portugal. Instituto Superior Técnico.
- CEM (2008): Coastal Engineering Manual. Washington, D.C: U.S. Army Corps of Engineers. Online verfügbar unter http://www.publications.usace.army.mil/USACE-Publications/Engineer-Manuals/udt_43544_param_page/4/.
- Chapuis, R. P. (2012): Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils. A review. In: *Bull Eng Geol Environ* 71 (3), S. 401–434. DOI: 10.1007/s10064-012-0418-7.
- Chapuis, R. P.; Baass, K.; Davenne, L. (1989): Granular soils in rigid-wall permeameters. Method for determining the degree of saturation. In: *Can. Geotech. J.* 26 (1), S. 71–79. DOI: 10.1139/t89-008.
- Chen, W.; Qiu, T. (2011): Simulation of Fluid Flow through Porous Media Using Smoothed Particle Hydrodynamics Method. In: Jie Han und Daniel A. Alzamora (Hg.): Geo-Frontiers Congress 2011. Dallas, Texas, United States, March 13–16, 2011, S. 4195–4203.
- CIRIA/CUR/CETMEF (2008): The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering. London (CIRIA / CUR, ISBN: 978-0-86017-683-1).
- Cistin, J. (1967): Zum Problem mechanischer Deformationen nichtbindiger Lockergesteine durch die Sickerwasserströmung in Erddämmen. In: *Wasserwirtschaft Wassertechnik* 2, S. 45–49.
- Costa, V. A. F.; Oliveira, L. A.; Baliga, B. R. (2008): Implementation of the Stress Jump Condition in a Control-Volume Finite-Element Method for the Simulation of Laminar Coupled Flows in Adjacent Open and Porous Domains. In: *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals* 53 (5), S. 383–411. DOI: 10.1080/10407790801960778.

- Crespo, A.J.C. (2008): Application of the Smoothed Particle Hydrodynamics model SPHysics to free-surface hydrodynamics. PhD Thesis. Universida de Vigo. Departamento de Física Aplicada.
- CUR161 (1993): Filters in de waterbouw. Civielttechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, CUR. Gouda (Rapport / CUR 161, 90-376-0029-8).
- Darcy, H. P. G. (1856): Les Fontaines publiques de la ville de Dijon. Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau, etc.
- Davidenkoff, R. (1967): Dimensionierung von Brunnenfiltern. Mitteilungen der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Nr. 25. Online verfügbar unter http://vzb.baw.de/publikationen/mitteilungsblaetter/0/mb25_Davidenkoff.pdf, zuletzt geprüft am 11.01.2017.
- de Graauw, A.; van der Meulen, T.; van der Does de Bye, M. (1983): Design criteria for granular filters. Delft: Delft Hydraulics (Publication / Delft Hydraulics ; 287).
- Dean, R. G.; Dalrymple, R. A. (1991): Water wave mechanics for engineers and scientists. 2nd print with corrections. vol. 2. Singapore: World Scientific.
- Dean, R. G.; Dalrymple, R. A. (2004): Coastal Processes with Engineering Applications. In: *Coastal Processes with Engineering Applications*, by Robert G. Dean and Robert A. Dalrymple, pp. 487. ISBN 0521602750. Cambridge, UK: Cambridge University Press, March 2004., S. 487.
- DeGroot, C. T.; Straatman, A. G. (2011): A Finite-Volume Model for Fluid Flow and Nonequilibrium Heat Transfer in Conjugate Fluid-Porous Domains Using General Unstructured Grids. In: *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals* 60 (4), S. 252–277. DOI: 10.1080/10407790.2011.601180.
- de-Pouplana, I.; Oñate, E. (2017): A FIC-based stabilized mixed finite element method with equal order interpolation for solid–pore fluid interaction problems. In: *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 41 (1), S. 110–134. DOI: 10.1002/nag.2550.
- DIN 18130-1, Mai 1998: DIN 18130-1, Teil 1: Laborversuche. Online verfügbar unter <https://www.beuth.de/de/norm/din-18130-1/3359382>.
- Diyaljee, V. A.; Raymond, G. P. (1982): Repetitive Load Deformation of Cohesionless Soil. In: *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 108 (10), S. 1215–1229.
- Drucker, D. C.; Prager, W. (1952): Soil mechanics and plastic analysis or limit design. In: *Quarterly of Applied mathematics* 10, S. 157–165.
- Dudgeon, C. R. (1966): An experimental study of the flow of water through coarse granular media. In: *La Houille Blanche* (7), S. 785–801. DOI: 10.1051/lhb/1966049.
- Duman, T.; Shavit, U. (2008): An Apparent Interface Location as a Tool to Solve the Porous Interface Flow Problem. In: *Springer Science+Business Media B.V. 2008* 87:509–524, S. 509–524. DOI: 10.1007/s11242-008-9286-6.
- Dupuit, J. E. J. (1863): Etudes théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables ... Paris: Dunod.
- Durst, F. (2006): Grundlagen der Strömungsmechanik. Eine Einführung in die Theorie der Strömung von Fluiden. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-31324-3>.
- Dybbs, A.; Edwards, R. V. (1984): A New Look at Porous Media Fluid Mechanics — Darcy to Turbulent: Springer Netherlands.
- Eckey, U.-P. H.-F.; Kosfeld, R.; Türc, M. (2008): Regressionsanalyse: Gabler. Online verfügbar unter http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-8349-8779-2_9.pdf.
- El Safti, H. (2015): Modelling and Analysis of Wave-Structure-Foundation Interaction for Monolithic Breakwaters. Dissertation. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany. Leichtweiß-Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources. Online verfügbar unter <http://digisrv-1.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/content/main/dissertationen.xml>.
- Elsafti, H.; Oumeraci, H. (2016): A numerical hydro-geotechnical model for marine gravity structures. In: *Computers and Geotechnics* 79, S. 105–129. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.05.025.
- Elsafti, H.; Oumeraci, H. (2017): Analysis and classification of stepwise failure of monolithic breakwaters. In: *Coastal Engineering* 121, S. 221–239. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2017.01.001.

- Engelund, F. (1953): On the laminar and turbulent flows of ground water through homogenous sand. København: Akademiet for de Tekniske Videnskaber (Transactions of the Danish Academy of Technical Sciences, 1953,3).
- Ergun, S. (1952): Fluid flow through packed columns. In: Chemical Engineering Progress (Vol. 48, No. 2), S. 89–94. Online verfügbar unter <https://www.industrydocumentslibrary.ucsf.edu/to-bacco/docs/#id=nnhp0209>, zuletzt geprüft am 18.11.2016.
- Ewers, J.; Karl, F. (2017): Determining Fluid Compressibility and Soil Permeability of Quasi Saturated Sand with the Alternating Flow Apparatus. In: Alessio Ferrari (Hg.): Advances in Laboratory Testing and Modelling of Soils and Shales (ATMSS). 1ST ED. 2017. [S.l.]: Springer International Publishing (Springer Series in Geomechanics and Geoengineering), S. 239–246.
- Fannin, R. J.; Slangen, P. (2014): On the distinct phenomena of suffusion and suffosion. In: *Géotechnique Letters* 4 (4), S. 289–294. DOI: 10.1680/geolett.14.00051.
- Fellin, W. (1999): Ein erster Einblick in die Hypoplastizität. In: *ÖIAZ* 144 (11-12), S. 434–436.
- Fenton, J. D.; McKee, W. D. (1990): On calculating the length of water waves. In: *Coastal Engineering* vol. 14, S. 499.
- Ferziger, J. H.; Peric, M. (2008): Numerische Strömungsmechanik: Springer-Verlag.
- Foda, M. A.; Hill, D. F.; DeNeale, P. L.; Huang, C.-M. (1997): Fluidization Response of Sediment Bed to Rapidly Falling Water Surface. In: *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.* 123 (5), S. 261–265. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1997)123:5(261).
- Forchheimer, P. (1903): Wasserbewegung durch Boden. In: Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure 1903, Nr. 49, S. 1736–1741.
- Foyer, G. (2013): Prediction Formulae for Processes on and in Porous Bonded Revetments – An Experimental and Numerical Study –. Dissertation. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany. Leichtweiß-Institut für Wasserbau.
- Gent, M. R. A. van (1992): Formulae to describe porous flow. [Delft]: Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology (Communications on hydraulic and geotechnical engineering, rept. no. 92-2).
- Gingold, R. A.; Monaghan, J. J. (1977): Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. In: *MNRAS* 181 (3), S. 375–389. DOI: 10.1093/mnras/181.3.375.
- Gotschol, A. (2002): Veränderlich elastisches und plastisches Verhalten nichtbindiger Böden und Schotter unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung. Dissertation. Universität Kassel, Kassel. Geotechnik. Online verfügbar unter https://kobra.bibliothek.uni-kassel.de/bitstream/urn:nbn:de:hebis:34-2009010525537/3/Dissertation_Gotschol.pdf.
- Groot, M. B. de; Bolton, M. D.; Foray, P.; Meijers, P.; Palmer, A. C.; Sandven, R. et al. (2006): Physics of liquefaction phenomena around marine structures. In: *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* vol. 132 (no. 4), S. 227.
- Gu, Z.; Wang, H. (1991): Gravity waves over porous bottoms. In: *Coastal Engineering* 15 (5-6), S. 497–524. DOI: 10.1016/0378-3839(91)90025-C.
- Hall, K. R.; Smith, G. M.; Turcke, D. J. (1995): Comparison of oscillatory and stationary flow. In: *Coastal Engineering* Vol. 24, S. 217–232.
- Han, Y.; Cundall, P. A. (2013): LBM–DEM modeling of fluid–solid interaction in porous media. In: *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 37 (10), S. 1391–1407. DOI: 10.1002/nag.2096.
- Hassanizadeh, S. M.; Gray, W. G. (1989): Boundary and interface conditions in porous media. In: *Water Resources Research* 25 (7), S. 1705–1715. DOI: 10.1029/WR025i007p01705.
- Hazen, A. (1892): Some physical properties of sands and gravels: with special reference to their use in filtration. Report to the Massachusetts State Board of Health. 24th Annual Report. Publication No. 34.
- Hazen, A. (1911): Discussions: Dams on sand foundations: American Society of Civil Engineers. In: *Transactions* 73, S. 37–58.
- Heißbaum, M. (2004): Geotechnical filters, the important link in scour protection. Proceedings, ICSE-2, 2nd International Conference on Scour and Erosion. In: Y.-M. Chiew, S.-Y. Lim und N.-S. Cheng (Hg.):

- Proceedings, ICSE-2, 2nd International Conference on Scour and Erosion. 2nd International Conference on Scour and Erosion. Singapore, November 14-17, 2004. Nanyang Technology Univ, Maritime Research Centre. Singapore, pp. 13–28. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Michael_Heibaum/publication/272576993_Geotechnical_filters_-_the_important_link_in_scour_protection/links/54e9eb340cf25ba91c80c326.pdf.
- Helmig, R.; Huber, R. (1998): Comparison of Galerkin-type discretization techniques for two-phase flow in heterogeneous porous media. In: *Advances in Water Resources* 21 (8), S. 697–711. DOI: 10.1016/S0309-1708(97)00023-7.
- Helmig, R.; Miller, C. T.; Jakobs, H.; Class, H.; Hilpert, M.; Kees, C. E.; Niessner, J. (2006): *Multiphase Flow and Transport Modeling in Heterogeneous Porous Media*: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F3-540-28073-1_71.pdf.
- Herle, I. (1997): Hypoplastizität und Granulometrie einfacher Korngerüste. Karlsruhe: Inst. für Bodenmechanik und Felsmechanik (Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) / Karlsruher Institut für Technologie Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik).
- Herwig, H.; Schmandt, B. (2015): *Strömungsmechanik. Physik - mathematische Modelle - thermodynamische Aspekte*. 3., erg. Aufl. 2015. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (SpringerLink : Bücher).
- Hettler, A. (1987): Schottertriaxialversuche mit statischem und zyklischem Belastungsverlauf. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* 36 (6).
- Hoffmans, G.; Den Adel, H.; Verheij, H. (2008): Horizontal Granular Filters. In: ISSMGE (Hg.): *Proceedings of the Fourth International Conference on Scour and Erosion*, C-16. Fourth International Conference on Scour and Erosion. Tokyo, Japan, 05.-07.11. ISSMGE, S. 480–485.
- Hoffmans, G. J. C. M. (2012): *The influence of turbulence on soil erosion*. Delft, Netherlands: Eburon (Deltares select series, v. 10).
- Holler, S. (2006): *Dynamisches Mehrphasenmodell mit hypoplastischer Materialformulierung der Feststoffphase*. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen, zuletzt geprüft am 27.01.2017.
- Holmes, D. W.; Williams, J. R.; Tilke, P. (2011): Smooth particle hydrodynamics simulations of low Reynolds number flows through porous media. In: *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 35 (4), S. 419–437. DOI: 10.1002/nag.898.
- Honjo, Y.; Veneziano, D. (1989): Improved Filter Criterion for Cohesionless Soils. In: *J. Geotech. Engrg.* 115 (1), S. 75–94. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:1(75).
- Hu, Y. (2000): *Zum Verformungsverhalten von wassergesättigten bindigen Böden unter zyklischer Belastung*. Habilitation. Universität Kassel, Kassel. Schriftenreihe Geotechnik.
- Jaffré, J. (1994): Flux calculation at the interface between two rock types for two-phase flow in porous media. In: *Transp Porous Med* 21 (3), S. 195–207. DOI: 10.1007/BF00617405.
- Jakob, C.; Konietzky, H. (2012): *Partikelmethoden. Eine Übersicht*. Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik. Freiberg.
- Jeng, D. S. (2003): Wave-induced sea floor dynamics. In: *Applied Mechanics Reviews* vol. 56 (no. 4), S. 407.
- Jeng, D. S. (2004): Modeling of Wave-Seabed-Structure interaction: a Review. In: Z. Yao (Hg.): *Computational Mechanics: Proceedings of the Sixth World Congress on Computational Mechanics in Conjunction with the Second Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics*, September 5-10, 2004, Beijing, China: Tsinghua University Press, S. 380–384.
- Jeng, D. S.; Li, F. (2007): Numerical model for wave-induced residual pore pressure in a porous seabed around the head of a breakwater. In: T. Takayama, T. Yasuda, D. Tsujio und S. Taniguchi (Hg.): *Coastal Engineering 2006. Proceedings of the 30th International Conference*, vol. 5. Coastal Engineering. San Diego, USA, 03.09.2007. KM: World Scientific ((Keine Angabe)), S. 4532.
- Jeng, D. S.; Rahman, M. S. (2000): Effective stresses in a porous seabed of finite thickness. Inertia effects. In: *Can. Geotech. J.* 37 (6), S. 1383–1392. DOI: 10.1139/t00-063.
- Jiang, F.; Oliveira, M. S.A.; Sousa, A. C.M. (2007): Mesoscale SPH modeling of fluid flow in isotropic porous media. In: *Computer Physics Communications* 176 (7), S. 471–480. DOI: 10.1016/j.cpc.2006.12.003.

- Joseph, D. D.; Nield, D. A.; Papanicolaou, G. (1982): Nonlinear equation governing flow in a saturated porous medium. In: *Water Resour. Res.* 18 (4), S. 1049–1052. DOI: 10.1029/WR018i004p01049.
- Kayser, J. (2013): Bemessung von geotechnischen Filtern unter instationärer Belastung. Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe. Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2013. Karlsruhe.
- Kayser, J.; Kunz, E.; Karl, F.; Schürenkamp, D.; Oumeraci, H. (2016): A New Test Apparatus for Alternating Flow in Geotechnical Engineering. In: *Geotechnical testing journal*. Philadelphia, Pa: ASTM.
- Kenney, T. C.; Lau, D. (1985): Internal Stability of Granular Filters-Reply. In: *Canadian Geotechnical Journal* Vol. 22, S. 215.
- Klein Breteler, M.; Den Adel, H.; Koenders, M. A. (Hg.) (1992): WL rapport H195. Taludbekledingen van gezette steen. Ontwerpregels voor het filter, A2 92 28. Unter Mitarbeit von M. Klein Breteler, H. Den Adel und M. A. Koenders. Deltares. Delft (WL rapport H195 deel 21 voor Rijkswaterstaat, DWW (TAW), A2 92 28). Online verfügbar unter <http://repository.tudelft.nl/view/hydro/uuid:0a1c2323-199c-4ca1-a710-60b3bef4c3b9/>.
- Knoeff, J. G.; Groot, M. B. de (1998): Hindcast with MYCYCLE of residual porepressures in centrifuge tests. Delft, The Netherlands (Report, MAST III, PROVERBS-Project: Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters).
- Koenders, M. A.; Williams, A. F. (1992): Flow equations of particle fluid mixtures. In: *Acta Mechanica* 92 (1-4), S. 91–116. DOI: 10.1007/BF01174169.
- Köhler, H. J. (Hg.) (2003): Transient excess pore water pressures causing soil deformation and hydraulic failure: Citeaser.
- Köhler, H. J.; Schwab, R. (2005): Fluidisierungsphänomene unter Wellenbelastung. In: *HANSA, International Maritime Journal* Vol. 12, S. 49.
- Köhler, H.-J. (1989): Messung von Porenwasserüberdrücken im Untergrund (Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover,, 0340-0077).
- Köhler, H.-J. (1993): The influence of hydraulic head and hydraulic gradient on the filtration process. In: J. Brauns, M. Heibaum und U. Schuler (Hg.): *Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering. Proceedings of the First International Conference 'Geo-Filter'.* First International Conference 'Geo-Filter'. Karlsruhe, Germany, 20.-22.10.1992. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press ((Keine Angabe)), XI, 403 S.
- Köhler, H.-J.; Haußecker, H.; Spies, H.; Beringer, O. (1999): Fluidisation and deformation of submerged soil due to fluctuating water level. In: XII Europ. Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 1999, S. 921–927.
- Köhler, H.-J.; Warnecke, W.; Holfelder, T. (2004): Filters Subjected to Transient Hydraulic Loading. In: *Geosynthesica* (Hg.): *Geofilters Conference Proceedings. 4th International Convrence on Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering - Geofilters 2004.* Windhuk, South Africa: A.A. Balkema, Rotterdam, S. 371.
- Kolymbas, D. (2011a): *Geotechnik. Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Kolymbas, D. (2011b): Konsolidierung. In: *Geotechnik: Springer*, S. 183–195.
- Kudella, M.; Oumeraci, H.; Groot, M. B. de; Meijers, P. (2006): Large-scale experiments on pore pressure generation underneath a caisson breakwater. In: *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* vol. 132 (no. 4), S. 310.
- Kvalstad, T. J. (1998): Degradation and residual pore pressure. Storm load history for design. Naples, Italy (Status Report, MAST III, PROVERBS-Project: Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters).
- Lade, P. V. (1977): Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces. In: *International Journal of Solids and Structures* 13 (11), S. 1019–1035. DOI: 10.1016/0020-7683(77)90073-7.
- Lade, P. V.; Duncan, J. M. (1975): Elastoplastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil. In: *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 101 (10), S. 1037–1053.

- Lafleur, J. (1984): Filter testing of broadly graded cohesionless tills. In: *Can. Geotech. J.* 21 (4), S. 634–643. DOI: 10.1139/t84-070.
- Lafleur, J.; Mlynarek, J.; Rollin, A. L. (1989): Filtration of Broadly Graded Cohesionless Soils. In: *J. Geotech. Engrg.* 115 (12), S. 1747–1768. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:12(1747).
- Langguth, H.-R.; Voigt, R. (2004): Hydrogeologische Methoden. Unter Mitarbeit von H.-R. Langguth und R. Voigt. 2. überarbeitete und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Langtangen, H. P.; Tveito, A.; Winther, R. (1992): Instability of Buckley-Leverett flow in a heterogeneous medium. In: *Transp Porous Med* 9 (3), S. 165–185. DOI: 10.1007/BF00611965.
- Lara, J. L. (2005): A numerical wave flume to study the functionality and stability of coastal structures. In: *PI-ANC Magazine AIPCN* (No. 121), S. 25.
- Lentz, R. W.; Baladi, G. Y. (1980): Prediction of permanent strain in sand subjected to cyclic loading. In: *Transportation Research Record*.
- Liebisch, S. (2015): Bonded Porous Revetments - Effect of porosity on wave-induced loads and hydraulic performance. An Experimental Study. Dissertation. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany. Leichtweiß-Institut für Wasserbau. Online verfügbar unter http://digisrv-1.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/receive/DocPortal_document_00060697.
- Lin, P. (2008): Numerical modeling of water waves. London: Taylor & Francis.
- Lin, P.; Karunarathna, S.A.S.A. (2007): Numerical Study of Solitary Wave Interaction with Porous Breakwaters. In: *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering* 2007, 2007 (133(5) 09/2007).
- Liu, P. L.-F.; Dalrymple, R. A. (1984): The damping of gravity water-waves due to percolation. In: *Coastal Engineering* 8 (1), S. 33–49. DOI: 10.1016/0378-3839(84)90021-8.
- Lowe, D. R. (1976): Subaqueous liquefied and fluidized sediment flows and their deposits. In: *Sedimentology* 1976 (23), S. 285–308.
- Lucy, L. B. (1977): A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. In: *The Astronomical Journal* 82, S. 1013. DOI: 10.1086/112164.
- Madsen, O. S. (1974): Wave Transmission through Porous Structures. In: *Journal of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division* Vol. 100 (No. WW3), S. 169.
- Madsen, O. S.; Grant, W. D. (1976): QUANTITATIVE DESCRIPTION OF SEDIMENT TRANSPORT BY WAVES. In: *Coastal Engineering Proceedings* 1 (15). DOI: 10.9753/icce.v15.%p.
- MAK (2013): Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Bundeswasserstraßen (MAK). Ausgabe 2013. Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe. Karlsruhe, Deutschland. Online verfügbar unter http://vzb.baw.de/publikationen.php?file=merkblaetter/0/BAWMerkblatt_Anwendung_Kornfilter_MAK_2013.pdf.
- Mavis, F. T.; Wilsey, E. F. (1936): A study of the permeability of sand.
- McCowan, J. (1894): On the highest wave of permanent type. In: Taylor and Francis (Hg.): *Philosophical Magazine Series 5*, vol. 38: Taylor & Francis (Volume 38 Issue 233), S. 351.
- Miche, M. R. (1944): Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante. In: *Annales des Ponts et Chaussées* vol. 114 (no. 2), S. 25.
- MMB (2013): Merkblatt Materialtransport im Boden (MMB). Ausgabe 2013. Unter Mitarbeit von C. Laursen und J. Kayser. Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe. Karlsruhe, Deutschland (ISSN 2192-5380). Online verfügbar unter http://www.baw.de/DE/service_wissen/publikationen/merkblaetter_empfehlungen_richtlinien/merkblaetter_empfehlungen_richtlinien.html.
- Moffat, R. (2005): Experiments on the internal stability of widely graded cohesionless soils. Ph.D. Thesis. University of British Columbia, Vancouver, Kanada.
- Molenkamp, F.; F, C. E. O.; Heusdens, J. J.; Koenders, M. A. (1979): Cyclic filter tests in a triaxial cell. In: British Geotechnical Society (Hg.): *Proc. 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2. 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Brighton, S. 97–102.

- Monaghan, J. J. (1988): An introduction to SPH. In: *Computer Physics Communications* 48 (1), S. 89–96. DOI: 10.1016/0010-4655(88)90026-4.
- Montenegro, H.; Stelzer, O.; Odenwald, B. (2015): Parameterstudie zum Einfluss von Gasbläschen im Grundwasser auf Porenwasserrdruck und effektive Spannungen bei Auflast- oder Wasserspiegeländerungen. In: *BAW Mitteilungen* 2015 (Nr. 98), S. 69–80. Online verfügbar unter http://vzb.baw.de/publikationen/mitteilungsblaetter/0/BAWMitteilungen_98_GesamtPDF_INTERNET_KORREKTUR.pdf.
- Muttray, M. (2000): Wellenbewegung an und in einem geschütteten Wellenbrecher - Laborexperimente im Großmaßstab und theoretische Untersuchungen. ILL;WK;IT;SBR;WED;., Braunschweig, Deutschland. Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig (02.10.2000).
- Muttray, M.; Oumeraci, H. (2005): Theoretical and experimental study on wave damping inside a rubble mound breakwater. In: *Coastal Engineering* vol. 52 (no. 8), S. 709.
- Narasimhan, A.; Lage, J. L. (2001): Modified Hazen-Dupuit-Darcy Model for Forced Convection of a Fluid With Temperature-Dependent Viscosity. In: *J. Heat Transfer* 123 (1), S. 31. DOI: 10.1115/1.1332778.
- Neef, M. J. d. (2000): Modelling capillary effects in heterogeneous porous media. Het modelleren van capillaire effecten in heterogene poreuze media. Techn. Univ., Diss. Delft.
- Nielsen, P. (1992): Coastal bottom boundary layers and sediment transport. Singapore: World Scientific Publishing.
- Niemunis, A.; Herle, I. (1997): Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. In: *Mech. Cohes.-Frict. Mater.* 2 (4), S. 279–299. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1484(199710)2:4<279::AID-CFM29>3.0.CO;2-8.
- Oertel, H.; Böhle, M.; Reviol, T. (2015): Strömungsmechanik. Für Ingenieure und Naturwissenschaftler. 7., überarb. Aufl. 2015. Wiesbaden: Springer Vieweg (SpringerLink : Bücher).
- O'Sullivan, C. (2011): Particulate discrete element modelling. a geomechanics perspective. Abingdon [England]: Taylor & Francis.
- Ottosen, N. S.; Ristinmaa, M. (2005): The mechanics of constitutive modeling. Amsterdam, London: Elsevier.
- Oumeraci, H.; Staal, T.; Pförtner, S.; Kudella, M.; Schimmels, S.; Verhagen, H.-J. (2010): Hydraulic performance of bonded permeable elastomeric revetments and subsoil response to wave loads. In: UNISDR (Hg.): Proceedings 4th International Tsunami Symposium. 4th International Tsunami Symposium. Toronto, Canada, 25.-29.10.2010. Tsunami Society. Server.
- Parker, J. C.; Lenhard, R. J.; Kuppusamy, T. (1987): A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous media. In: *Water Resour. Res.* 23 (4), S. 618–624. DOI: 10.1029/WR023i004p00618.
- Pedras, M. H.J.; Lemos, M. J.S. de (2001): Macroscopic turbulence modeling for incompressible flow through undeformable porous media. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44 (6), S. 1081–1093. DOI: 10.1016/S0017-9310(00)00202-7.
- Pfletschinger-Pfaff, H. (2015): FuE-Abschlussbericht: Numerische Simulation von hydraulisch induziertem Sedimenttransport in Erdbauwerken. A39520470005. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe. Karlsruhe.
- Polubarinova-Kochina, P. Y. (1962): Theory of groundwater movement (Translated by JMR Dewiest), Princeton University Press. In: *Princeton, N.J.*
- Prinz, E. (1923): Handbuch der Hydrologie. Wesen, Nachweis, Untersuchung und Gewinnung unter irdischer Wasser: Quellen, Grundwasser, unterirdische Wasserläufe, Grundwasserfassungen. Zweite, ergänzte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Rahman, M. S.; Seed, H. B.; Booker, J. R. (1977): Pore pressure development under offshore gravity structures. In: *Journal of Geotechnical Engineering Division* (vol. 12), S. 1419.
- Raudkivi, A. J. (1982): Grundlagen des Sedimenttransports. Berlin [u.a.]: Springer ((Keine Angabe)).
- Reynolds, O. (1894): On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. In: *Proceedings of the Royal Society of London* 56 (336-339), S. 40–45.

- Richwien, W.; Perau, E. (1997): Residual pore water pressure and degradation beneath caisson breakwaters - determination of design parameters. SFO;MP1; 5 p. Las Palmas, Gran Canaria, 16.04.1997.
- Sandven, R.; Husby, E.; Husby, J. E.; Jønland, J.; Roksvåg, K. O.; Stæhli, F.; Tellugen, R. (2007): Development of a sampler for measurement of gas content in soils. In: *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* vol. 133 (no. 1), S. 3.
- Schendel, A.; Goseberg, N.; Schlurmann, T. (2015): Experimental Study on the Erosion Stability of Coarse Grain Materials under Waves. In: *Journal of Marine Science and Technology* 23 (6), S. 937–942.
- Schlichting, H.; Gersten, K. (2006): Grenzschicht-Theorie. 10., überarb. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer.
- Schretlen, J. J.L.M.; Ribberink, J. S.; O'Donoghue, T. (2011): Boundary layer flow and sand transport under full scale surface waves. In: *Int. Conf. Coastal. Eng.* 1 (32). DOI: 10.9753/icce.v32.sediment.4.
- Schuler, U.; Brauns, J. (1993): Behaviour of Coarse and Well-Graded Filters. In: J. Brauns und M. Heibaum (Hg.): *Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering: Proceedings of the 1st International Conference 'Geo-Filter'*. 1st International Conference "Geo-Filters". Karlsruhe, 20-22 Okt. 1992.
- Schulze, R.; Stelzer, O. (2015): Soil modelling considering the influence of gas inclusions in pore water below the piezometric line - a short introduction. In: Tom Schanz und A. Hettler (Hg.): *Aktuelle Forschung in der Bodenmechanik 2015. Tagungsband zur 2. Deutschen Bodenmechanik Tagung*, Bochum. Berlin: Springer Vieweg. Online verfügbar unter http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-662-45991-1_7.pdf.
- Schürenkamp, D.; Oumeraci, H. (B.) (2015): Grundlagen für die hydraulische Bemessung von Kornfiltern. Zwischenbericht: Versuchsdurchführung mit der Wechseldurchströmungsanlage. In: LWI (Hg.): *Berichte Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig*, Nr. 1057. Braunschweig.
- Serwatka, T. (2016): Untersuchung von (geo-) hydraulischen Prozessen in Kornfiltern durch numerische Modellierung. Studienarbeit. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig. Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abt. Hydromechanik und Küsteningenieurwesen.
- Shavit, U. (2009): Special Issue on "Transport Phenomena at the Interface Between Fluid and Porous Domains". In: *Transp Porous Med* 78 (3), S. 327–330. DOI: 10.1007/s11242-009-9414-1.
- Shenton, M. (1981): Deformation of railway ballast under repeated loading conditions. In: James Constant (Hg.): *Fundamentals of strategic weapons. Offense and defense systems. Symposium on Railroad Track Mechanics* Princeton University. The Hague, Boston: Martinus Nijhoff Publishers.
- Shepherd, R. G. (1989): Correlations of Permeability and Grain Size. In: *Ground Water* 27 (5), S. 633–638. DOI: 10.1111/j.1745-6584.1989.tb00476.x.
- Sherard, J. L.; Dunnigan, L. P.; Talbot, J. R. (1984): Basic Properties of Sand and Gravel Filters. In: *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering* Vol. 110, No. 6, S. 684.
- Shields, A. (1936): Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. In: *Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffsbau* Heft 26, S. 1.
- Shih, R.W.K. (1991): Permeability Characteristics of Rubble Material - New Formulae. In: B. L. Edge (Hg.): *Coastal Engineering Conference. Proceedings 22nd International Conference on Coastal Engineering*, July 2-6 1990, Delft, The Netherlands, No. 22. Unter Mitarbeit von B. L. Edge. New York, NY: American Society of Civil Engineers (Coastal Engineering, No. 22), S. 1499–1512. Online verfügbar unter <https://icce-ojs-tamu.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/4541/4222>, zuletzt geprüft am 18.05.2015.
- Shire, T. (2014): Micro-scale modelling of granular filters. Ph.D. Imperial College London.
- Smith, G. M. (1991): Comparison of Stationary and Oscillatory Flow Through Porous Media. Queen's University Kingston. Online verfügbar unter <http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:b8704ef9-7348-4af9-97ab-7862bd67ec15/Smith1991.pdf>.
- Soulsby, R. L. (1997): Dynamics of marine sand - A manual for practical application. London: Thomas Telford.
- SPM (1984): Shore protection manual, vol. II, Chapters 6 through 8; appendices A through D. Vicksburg, Mississippi, USA.

- Springer, D. S.; Loaiciga, H. A.; Cullen, S. J.; Everett, L. G. (1998): Air Permeability of Porous Materials Under Controlled Laboratory Conditions. In: *Ground Water* 36 (4), S. 558–565. DOI: 10.1111/j.1745-6584.1998.tb02829.x.
- Streif, H. (1990): Das ostfriesische Küstengebiet. Nordsee, Inseln, Watten und Marschen. 2. völlig Neubearb. Aufl. Berlin: Borntraeger (Sammlung geologischer Führer, Bd. 57).
- Sumer, B. M.; Fredsøe, J. (Hg.) (2002): The Mechanics of Scour in the Marine Environment. 17 Bände. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd (Advanced series on ocean engineering).
- Szymkiewicz, A. (2012): Modelling Water Flow in Unsaturated Porous Media. Accounting for Nonlinear Permeability and Material Heterogeneity. Dordrecht: Springer (GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences).
- Taylor, D. W. (1948): Fundamentals of soil mechanics. New York: J. Wiley.
- Terzaghi, K. (Hg.) (1943): Theoretical soil mechanics. Wiley InterScience (Online service). [Elektronische Ressource]. New York: Wiley.
- Terzaghi, K.; Peck, B. (1961): Die Bodenmechanik in der Baupraxis. Unter Mitarbeit von A. Bley. Berlin [u.a.]: Springer.
- Tørum, A. (2007): Wave-induced pore pressures — air/gas content. In: *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* vol. 133 (no. 1), S. 83.
- Truckenbrodt, E. (2008): Fluidmechanik 1: Grundlagen und elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide. 4., ergänzte Auflage 1996., [Nachdruck]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Klassiker der Technik). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-79018-1>.
- Ulker, M. B. C.; Rahman, M. S.; Guddati, M. N. (2012): Breaking wave-induced response and instability of seabed around caisson breakwater. In: *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 36 (3), S. 362–390. DOI: 10.1002/nag.1073.
- van de Sande, S.A.H.; Uijtewaal, W. S. J.; Verheij, H. J. (2015): Validation and Optimization of a Design Formula for stable geometrically open filter structures. In: *Int. Conf. Coastal. Eng.* 1 (34), S. 48. DOI: 10.9753/icce.v34.structures.48.
- van der Meulen, T. (1983): Granulaire filters. Stroming loodrecht op scheidingsvlak. Hg. v. Waterloopkundig Laboratorium. Delft Hydraulics Laboratory. Delft (M 898-III).
- van Gent, M. R.A.; Wolters, G. (2015): Granular slopes with open filters under wave loading. In: *Coastal Engineering* 104, S. 135–150. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2015.06.004.
- van Gent, M.R.A. (1993): Stationary and oscillatory flow through coarse porous media. In: *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering*, S. 62.
- van Genuchten, M. T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. In: *Soil science society of America journal* 44 (5), S. 892–898.
- van Rijn, L. C. (1984): Sediment Transport. part I: bed load transport; part II: suspended load; part III: bed forms and alluvial roughness. In: *Journal of Hydraulics Division* vol. 10, S. 1431.
- Verheij, H.; Hoffmans, G.; Dorst, K.; Vandesande, S. (2012): Interface stability of granular filter structures under currents. In: Société hydrotechnique de France (Hg.): ICSE-6. Proceedings of the 6th International Conference on Scour and Erosion. Paris, 27.-31.08. Paris: Société hydrotechnique de France. Online verfügbar unter <http://scour-and-erosion.baw.de/icse6-cd/data/articles/000225.pdf>.
- Wang, B.; Vardon, P. J.; Hicks, M. A.; Chen, Z. (2016): Development of an implicit material point method for geotechnical applications. In: *Computers and Geotechnics* 71, S. 159–167. DOI: 10.1016/j.compgeo.2015.08.008.
- Wayllace, A.; Alsherif, N.; Lu, N. (2015): Measuring the Soil Water–Retention Curve Under Positive and Negative Matric Suction Regimes 38 (4), S. 442–451. DOI: 10.1520/GTJ20140258.
- Whitaker, S. (1996): The Forchheimer equation: A theoretical development. In: *Transp Porous Med* 25 (1), S. 27–61. DOI: 10.1007/BF00141261.
- Wolffersdorff, P.-A. von (1997): Verformungsprognosen für Stützkonstruktionen. Karlsruhe: Inst. für Bodenmechanik und Felsmechanik.

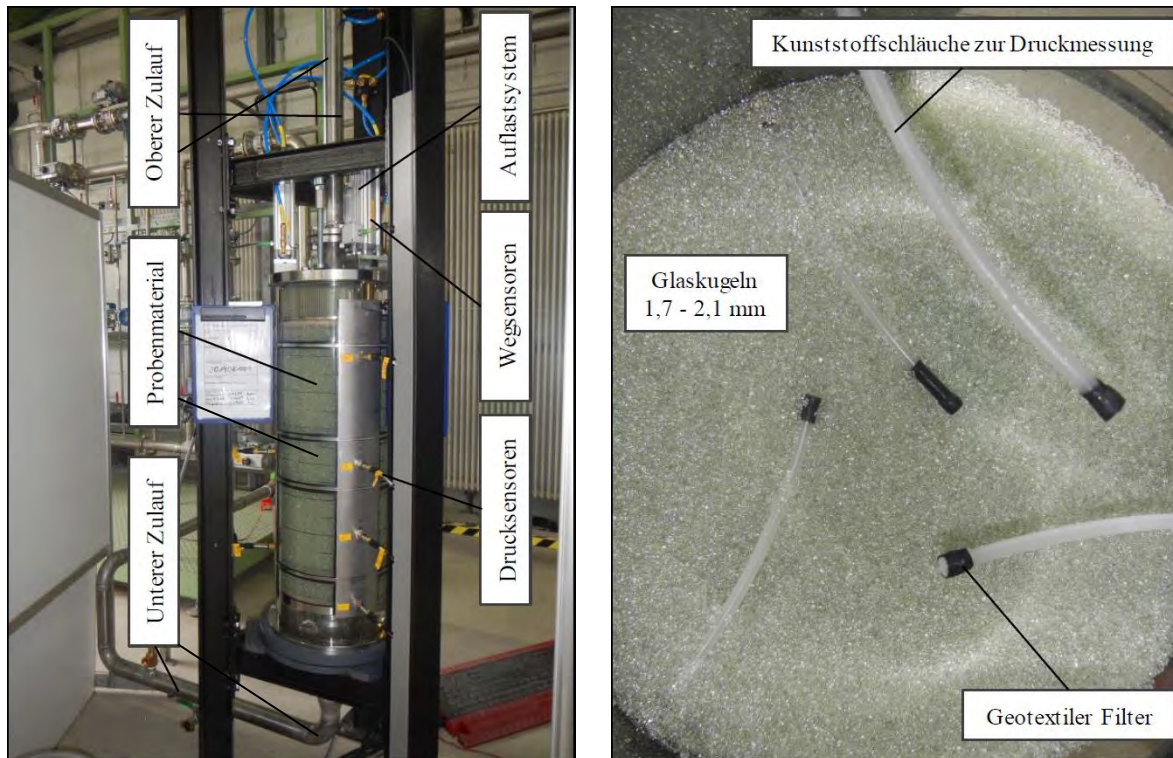
- Wolters, G.; Rudolph, D.; Hofland, B.; Verheij, H. (2010): On the Behaviour of Open Filters Under Wave Loading. In: S. E. Burns, S. K. Bhatia, Avila, C. M. C. und B. E. Hunt (Hg.): Scour and Erosion. International Conference on Scour and Erosion (ICSE-5). San Francisco, CA, USA, 07.-10.11.2010. Reston: American Society of Civil Engineering (ASCE), S. 142–151.
- Wolters, G.; van Gent, M. R.A. (2012): Granular Open Filters on a Horizontal Bed under Wave and Current Loading. In: *Int. Conf. Coastal. Eng.* 1 (33). DOI: 10.9753/icce.v33.structures.32.
- Wörman, A. (1989): Riprap Protection without Filter Layers. In: *Journal of Hydraulic Engineering* Vol. 115. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1989)115:12(1615).
- Wyckoff, R. D.; Botset, H. G. (1936): The Flow of Gas-Liquid Mixtures Through Unconsolidated Sands. In: *Physics* 7 (9), S. 325. DOI: 10.1063/1.1745402.
- Young, Y. L.; White, J. A.; Xiao, H.; Borja, R. I. (2009): Liquefaction potential of coastal slopes induced by solitary waves. In: *Acta Geotech.* 4 (1), S. 17–34. DOI: 10.1007/s11440-009-0083-6.
- Zamzamian, K.; Hashemi, M. Y. (2015): A novel meshless method for incompressible flow calculations. In: *Engineering Analysis with Boundary Elements* 56, S. 106–118. DOI: 10.1016/j.engana-bound.2015.02.009.
- Zen, K.; Yamazaki, H. (1990): Mechanism of wave-induced liquefaction and densification in seabed. In: *Soils and Foundations* 30 (4), S. 90–104.
- Zeng, Z.; Grigg, R. (2006): A Criterion for Non-Darcy Flow in Porous Media. In: *Transp Porous Med* 63 (1), S. 57–69. DOI: 10.1007/s11242-005-2720-3.
- Zhao, H.; Jeng, D.-S.; Zhang, H.; Zhang, J.; Zhang, H. (2016): 2-D integrated numerical modeling for the potential of solitary wave-induced residual liquefaction over a sloping porous seabed. In: *J. Ocean Eng. Mar. Energy* 2 (1), S. 1–18. DOI: 10.1007/s40722-015-0033-3.
- Zhao, J.; Shan, T. (2013): Coupled CFD–DEM simulation of fluid–particle interaction in geomechanics. In: *Powder Technology* 239, S. 248–258. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.02.003.
- Zhou, C.; Shen, Z. J.; Yin, J. H. (2004): Biot Dynamic Consolidation Finite Element Analysis using a Hypo-Plasticity Model. No. 351. In: Conference Proceedings 13th World Conference on Earthquake Engineering. 13WCEE Canada 2004. Vancouver, B.C., Canada, 1 - 6 August 2004. International Association for Earthquake Engineering.
- Ziems, J. (1968): Beitrag zur Kontakterosion nichtbindiger Erdstoffe. Dresden, Germany (Bericht TU Dresden, Fakultät für Bau-, Wasser- und Forstwesen).
- Zienkiewicz, O. C.; Chan, A.H.C.; Pastor, M.; Schrefler, B. A.; Shiomi, T. (1999): Computational geomechanics. England: John Wiley & Sons.
- Zienkiewicz, O. C.; Chang, C. T.; Bettess, P. (1980): Drained, undrained, consolidating and dynamic behaviour assumptions in soils. In: *Géotechnique* vol. 30 (no. 4), S. 385. Online verfügbar unter 10.1680/geot.1980.30.4.385.
- Zou, S. (2007): Coastal Sediment Transport Simulation by Smoothed Particle Hydrodynamics. PhD Thesis. The Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland.

Anhang

Anhang A:	Fotodokumentation der Versuchsanlage	218
Anhang B:	Konstruktion der Versuchszelle.....	219
Anhang C:	Literaturübersicht hydraulischer Laborexperimente.....	220
Anhang D:	Versuchsprogramm der Laborexperimente	221
Anhang E:	Bemessungsdiagramm.....	222

Anhang A: Fotodokumentation der Versuchsanlage

Versuchszelle der Wechseldurchströmungsanlage (WDA)



a) Versuchszelle der Wechseldurchströmungsanlage b) Filterröhrchen zur Druckmessung mit Probenmaterial in der Zelle (Glaskugeln 1,7 - 2,1 mm)

Abb. A1: Vorversuche mit der Wechseldurchströmungsanlage a) Versuchszelle, b) Probe mit Filterröhrchen

Wechseldurchströmungsanlage (WDA) der BAW, Karlsruhe

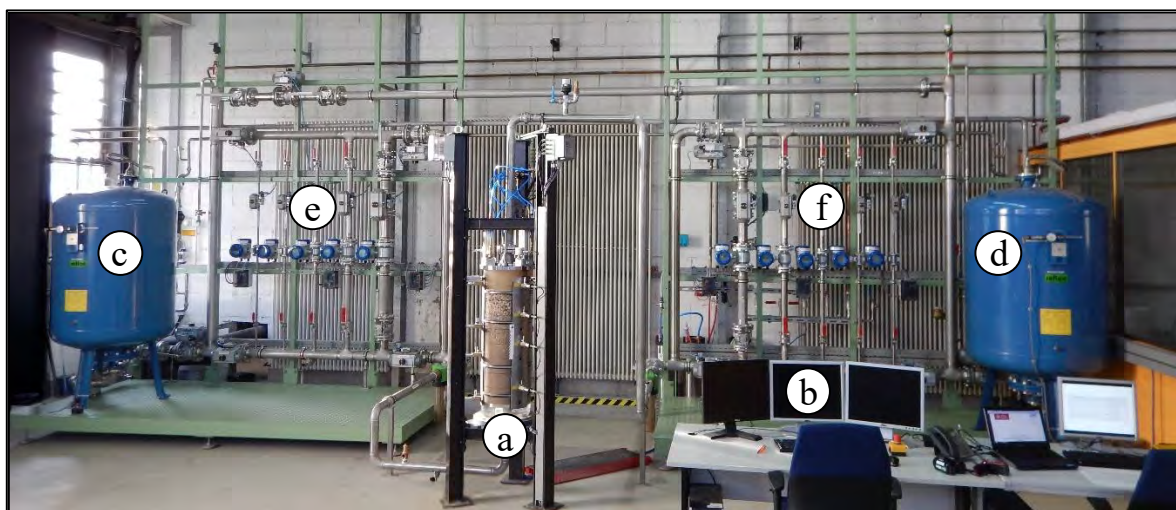


Abb. A2: Versuchsdurchführung mit der Wechseldurchströmungsanlage, a) Versuchszelle mit Probe, b) Steuerstand der Mess-/Regeltechnik, c) linker Drucktank (untere Randbedingung), d) rechter Drucktank (obere Randbedingung), e) Durchflussmesseinrichtung (unten), f) Durchflussmesseinrichtung (oben)

Anhang B: Konstruktion der Versuchszelle

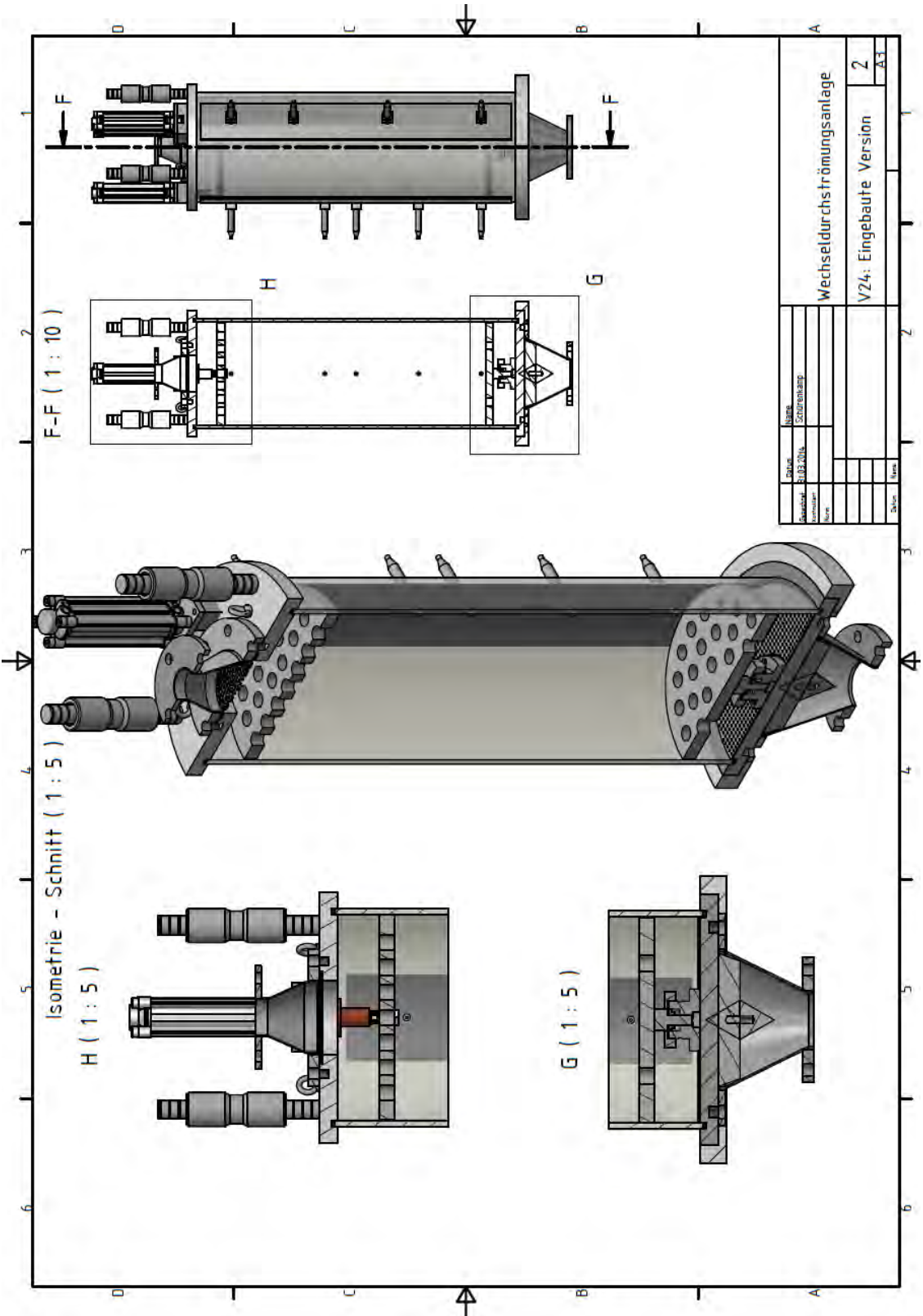









Abb. B1: Konstruktionszeichnung der Versuchszelle (nicht maßstäblich)

Anhang C: Literaturübersicht hydraulischer Laborexperimente

Tab. C1: Auswahl relevanter Untersuchungen zur Filterstabilität unter vertikaler schichtorthogonaler Strömung

Autor	Strömung	Δh_{\max}	ΔL_{\max}	i_{\max}	p_{Auflast}	T	Basis/Filter	Einschränkungen
		[m]	[m]	[m/m]	[kN/m ²]	[s]	[mm]	
Belyashevskii et al. (1972)		$2,5 < h_{\text{osz.}} < 5,5$	1,43	$0,0 < i_{\text{Losz}} < 0,67$ $0,5 < i_{\text{Lstat}} < 1,5$	41,20 - 62,78	$0,2 < T < 1,0$	$d_{F50B}/d_{B50} < 40$, $d_{B50} \approx 0,35$ mm, $2 < nF < 5$	Untersuchung kleiner Gradienten an Böschungssicherungen; Eingeschränkter Frequenzbereich; Auflast in eingeschränktem Bereich
de Graauw et al. (1983)		7,70	1,10	$i_{\text{Losz}} < 7$	< 130	10	$d_{B50} = 0,15$ und $0,55$ mm	Eingeschränkter Frequenzbereich; sehr hohe Auflast (Verspannte Probe); keine regelmäßige oszillierende Strömung, geringe Amplitude
de Graauw et al. (1983)		1,10	1,10	$i_{\text{Losz}} < 5$	-	10	$d_{B50} = 0,15$ $d_{F15} = 2,5$, $d_{F50} = 0,1$ $n_r = 0,35$	
Köhler (1993)		0,70 - 0,90 0,65 cm Absunk	$\sim 0,35$	2,00	-	10	$d_{B50} = 5,5$ mm, $d_{B50} = 0,045$ mm u. $d_{B50} = 13$ mm	Absunk, Frequenzbereich nicht untersucht, Geringe Amplitude; Auflast nicht explizit untersucht
Köhler et al. (1999), Köhler et al. (2004)		0,65 - 1,75 m, max. $\Delta h = 4,25$ m	0,21 - 0,32	$3,1 < i_{\text{Losz}} < 5,5$	1,3 - 2,8 - 8,5	-	$d_{B50} = 0,2$ mm	Absunk, Frequenzbereich nicht untersucht; Druckänderung im Tank ohne Durchströmung, geringe Amplitude; Auflast nicht explizit untersucht
Molenkamp et al. (1979)		5,0 - 12,5 mWS	1,00	$0,4 < i_{\text{Losz}} < 2,3$	125	10	$d_{B50} \approx 0,2$ mm, $d_{F50a} = 10$ mm $d_{F50b} = 1$ mm	Auflast nicht untersucht; Triaxialzelle, oszillierende Strömung mit gleichgerichteter Strömung (in Richtung der Gravitation) überlagert
Klein Breteler et al. (1992)		H = 0,40	0,60 m	$0 < i_{\text{Losz}} < 0,4$	-	2,5	$d_{B50} = 0,15$	Oszillierend parallel und oszillierend orthogonal an einer Böschung (1:2,5)

Tab. D1: Wellenparameter des Versuchsprogramms

[illegible]

Anhang E: Bemessungsdiagramm

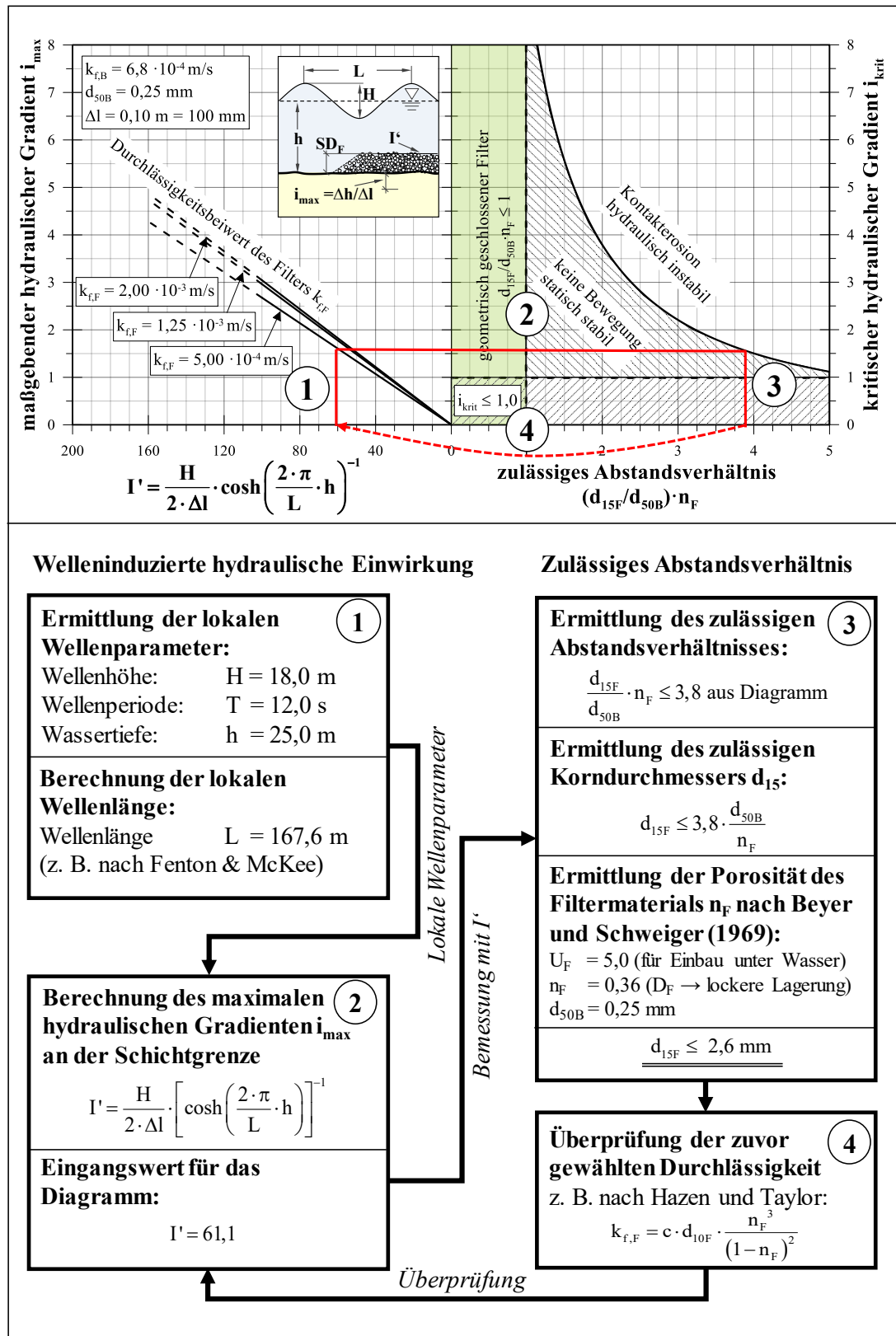


Abb. E.1: Vorgehen zur grafischen Ermittlung des zulässigen Abstandsverhältnisses d_{15F}/d_{50B} anhand eines Bemessungsbeispiels